

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID
ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR



**Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de
Telecomunicación**

TRABAJO FIN DE GRADO

ANTENAS MIMO MULTIBANDA

Autor: Raúl Calzada Trujillo
Tutor: Bazil Taha Ahmed

JULIO 2019

ANTENAS MIMO MULTIBANDA

AUTOR: Raúl Calzada Trujillo

TUTOR: Bazil Taha Ahmed

Grupo de Radiofrecuencia: Circuitos, Antenas y Sistemas (RFCAS)

Escuela Politécnica Superior

Universidad Autónoma de Madrid

Julio de 2019

Resumen (castellano)

En este Trabajo Fin de Grado se ha diseñado, construido y medido distintos tipos de antenas multibanda (2,4 y 5 GHz) MIMO.

Para el diseño de nuestras antenas se buscará abarcar un ancho de banda aproximado entre (2,4 - 2,5 GHz) y (5 - 6 GHz).

Cuando hablamos de antenas MIMO nos estamos refiriendo a una antena con varios elementos del mismo tamaño y características, para nuestro caso, primero se ha diseñado la antena con un solo elemento, para posteriormente hacerla con dos elementos y finalmente con cuatro.

Otro aspecto para tener en cuenta en el diseño de nuestras antenas MIMO, ha sido la creación de la barrera metálica entre elementos con el objetivo de reducir la interferencia entre ellos, así pues, se variará la forma y tamaño de la barrera hasta dar con la óptima.

Tras obtener el mejor resultado posible con la antena de dos elementos con barrera metálica, se implementará la de cuatro elementos siguiendo los mismos pasos anteriormente citados para finalmente pasar a la construcción de estas en el laboratorio de circuitos impresos.

Por último, se precederá a realizar las medidas de nuestras antenas construidas con el equipamiento apropiado para comprobar que se corresponde con lo simulado y se obtendrá su diagrama de radiación en la cámara anecoica.

Abstract (English)

In this Degree project, different types of multiband (2,4 y 5 GHz) MIMO antennas have been designed, constructed and measured.

For the design of our antennas we seek to cover an approximate bandwidth between (2.4 - 2.5 GHz) and (5 - 6 GHz).

Speaking about MIMO antennas, we are referring to an antenna with several elements of the same size and characteristics, first we have designed the antenna with a single element, then with two elements and finally with four elements.

Metallic barriers between elements has been used to increase the isolation between elements.

Measurements show that fabricated antennas satisfy the design requirements.

Palabras clave (castellano)

Antena, MIMO, WiFi, parámetros S.

Keywords (inglés)

Antenna, MIMO, WiFi, S Parameters

Agradecimientos

En primer lugar, tengo que dar las gracias a mi tutor durante este año, Bazil Taha. Dese el principio has estado ayudándome en todas mis dudas y guiándome paso a paso, ya fuese en la universidad o desde casa con total disponibilidad por el teléfono. Gracias Bazil, por haber hecho posible la realización de este TFG. No me quiero olvidar de Eduardo García, que me ayudó siempre que le necesite y fue la persona que me enseñó a hacer las medidas de las antenas en el laboratorio.

Por otro lado, gracias a mis compañeros Beatriz Cervantes, Daniel Gabriel, Beatriz Cid, Mario Díaz, Marta Villanueva y otros tantos que me dejo, que durante la carrera me han ayudado con las practicas, hemos estudiado juntos durante horas, nos hemos reído muchísimo y han sido grandes amigos, pero sobretodo, me han demostrado que con esfuerzo y sacrificio se puede lograr todo.

También quiero dar las gracias a la persona más especial que he conocido en la carrera, Cristina Mancha, gracias por apoyarme en mi día a día y estar a mi lado en todo.

Por último, quiero dar las gracias a toda mi familia, a mi hermano Rubén y en especial a mis padres, María Antonia Trujillo y Miguel Ángel Calzada, porque ellos han sido los que me han enseñado el camino a seguir y siempre me han ayudado en todos mis estudios, ya no solo durante la carrera si no desde pequeñito, os quiero.

Muchas gracias,

CONTENIDO

1. Introducción.....	1
1.1. <i>Motivación del proyecto.</i>	1
1.2. <i>Objetivos y enfoque.</i>	2
1.3. <i>Organización de la memoria.</i>	2
2. Fundamentos teóricos de antenas y tecnología WiFi.....	3
2.1. <i>Definición de antena.</i>	3
2.2. <i>Parámetros básicos.</i>	3
2.2.1. Impedancia de entrada.....	4
2.2.2. Parámetros S.....	4
2.2.3. Diagrama de radiación.....	6
2.3. <i>Teoría microstrip.</i>	7
2.3.1. Alimentación microstrip.....	7
2.4. <i>Tecnología WiFi.</i>	8
2.4.1. Introducción.....	8
2.4.2. Características.....	8
3. Criterios de diseño.	9
3.1. <i>Introducción.</i>	9
3.2. <i>Banda de trabajo, coeficiente de reflexión y acoplamiento.</i>	9
3.3. <i>Parámetros de los sustratos utilizados.</i>	10
3.4. <i>Coeficiente de correlación y ganancia de diversidad.</i>	10
4. Diseño del elemento.	11
4.1. <i>Introducción.</i>	11
4.2. <i>Antena de un elemento.</i>	11
4.3. <i>Antena MIMO de 2 elementos.</i>	13
4.3.1. Antena MIMO de 2 elementos sin barrera metálica.....	13
4.3.2. Antena MIMO de 2 elementos con barrera metálica.....	15
4.4. <i>Antena MIMO de 4 elementos en paralelo.</i>	17
4.4.1. Antena MIMO de 4 elementos en paralelo sin barrera.....	17
4.4.2. Antena MIMO de 4 elementos con barrera.	20
4.5. <i>Antena MIMO de 4 elementos perpendiculares.</i>	23
4.5.1. Antena MIMO de 4 elementos perpendiculares sin barrera.	23
4.5.1. Antena MIMO de 4 elementos perpendiculares con barrera.....	26
5. Resultados de las medidas.	29
5.1. <i>Antena MIMO elemento unitario.</i>	29
5.2. <i>Antena MIMO de 2 elementos con barrera.</i>	30
5.3. <i>Antena MIMO de 4 elementos paralelos con barrera.</i>	34
5.4. <i>Antena MIMO de 4 elementos perpendiculares con barrera.</i>	38
5. Conclusiones y trabajo futuro.	41

6. Referencias.....	43
7. Anexos.....	I

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de bloques: transmisor-receptor.....	3
Figura 2. Esquema de una red de dos puertos con ondas incidentes y reflejadas asociadas.....	4
Figura 3. Diagramas de radiación isotrópico (izquierda), omnidireccional (centro) y directivo (derecha). 6	
Figura 4. Estructura de línea microstrip.....	7
Figura 5. Criterio de validez para el coeficiente de reflexion.....	9
Figura 6. Grado de satisfacción del coeficiente de Acoplamiento.....	10
Figura 7. Primera aproximación antena de dos elementos	11
Figura 8 antena de un elemento: planta (a) alzado (b).....	12
Figura 9. Antena WiFi un elemento: Coeficiente de Reflexión $S_{1,1}$	13
Figura 10. Antena MIMO de 2 elementos.....	13
Figura 11. Antena MIMO de 2 elementos: Coeficientes de Acoplamiento.	14
Figura 12. Antena MIMO de 2 elementos con barrera.	15
Figura 13. Antena MIMO de 2 elementos perpendiculares: Coeficientes de Reflexión.	16
Figura 14. Antena MIMO de 2 elementos perpendiculares: Coeficientes de Acoplamiento.	16
Figura 15. Antena MIMO de 2 elementos con barrera.	17
Figura 16. Antena MIMO de 4 elementos paralelos: Coeficientes de Reflexión.	18
Figura 17. Antena MIMO de 4 elementos paralelos: Coeficientes de Acoplamiento $S_{2,1}$ $S_{1,2}$ $S_{4,3}$ $S_{3,4}$.18	
Figura 18. Antena MIMO de 4 elementos paralelos: Coeficientes de Acoplamiento $S_{3,1}$ $S_{4,2}$ $S_{1,3}$ $S_{2,4}$.19	
Figura 19. Antena MIMO de 4 elementos paralelos: Coeficientes de Acoplamiento $S_{4,1}$ $S_{3,2}$ $S_{2,3}$ $S_{1,4}$.19	
Figura 20. Antena MIMO de 4 elementos con barrera.	20
Figura 21. Antena MIMO de 4 elementos paralelos: Coeficientes de Reflexión.	21
Figura 22. Antena MIMO de 4 elementos paralelos: Coeficientes de Acoplamiento $S_{2,1}$ $S_{1,2}$ $S_{4,3}$ $S_{3,4}$.21	
Figura 23. Antena MIMO de 4 elementos paralelos: Coeficientes de Acoplamiento $S_{3,1}$ $S_{4,2}$ $S_{1,3}$ $S_{2,4}$.22	
Figura 24. Antena MIMO de 4 elementos paralelos: Coeficientes de Acoplamiento $S_{4,1}$ $S_{3,2}$ $S_{2,3}$ $S_{1,4}$.22	
Figura 25. Antena MIMO de 4 elementos perpendiculares sin barrera.....	23
Figura 26. Antena MIMO de 4 elementos perpendiculares sin barrera: Coeficientes de Reflexión.	24
Figura 27. Antena MIMO de 4 elementos perpendiculares sin barrera: Coeficientes de Acoplamiento $S_{2,1}$ $S_{1,2}$ $S_{4,3}$ $S_{3,4}$	24
Figura 28. Antena MIMO de 4 elementos perpendiculares sin barrera: Coeficientes de Acoplamiento $S_{3,1}$ $S_{4,2}$ $S_{1,3}$ $S_{2,4}$	25
Figura 29. Antena MIMO de 4 elementos perpendiculares sin barrera: Coeficientes de Acoplamiento $S_{4,1}$ $S_{3,2}$ $S_{2,3}$ $S_{1,4}$	25
Figura 30. Antena MIMO de 4 elementos perpendiculares con barrera.	26
Figura 31. Antena MIMO de 4 elementos perpendiculares con barrera: Coeficientes de Reflexión.....	26
Figura 32. Antena MIMO de 4 elementos perpendiculares con barrera: Coeficientes de Acoplamiento $S_{2,1}$ $S_{1,2}$ $S_{4,3}$ $S_{3,4}$	27

Figura 33. Antena MIMO de 4 elementos perpendiculares con barrera: Coeficientes de Acoplamiento S _{3,1} S _{4,2} S _{1,3} S _{2,4} .	27
Figura 34. Antena MIMO de 4 elementos perpendiculares con barrera: Coeficientes de Acoplamiento S _{4,1} S _{3,2} S _{2,3} S _{1,4} .	28
Figura 35. Antena elemento unitario construida	30
Figura 36. Antena elemento unitario construida: Coeficiente de Reflexión.	30
Figura 37. Antena MIMO de 2 elementos ocn barrera construida.	31
Figura 38. Antena MIMO de 2 elementos con barrera construida: Coeficientes de Reflexión.	31
Figura 39. Antena MIMO de 2 elementos construida: Coeficientes de Acoplamiento.	31
Figura 40. Antena MIMO 2 elementos construida: diagrama de radiación en 2.45 (a) y 5.5 (b) GHz del elemento 1	32
Figura 41. Antena MIMO de 2 elementos construida: diagrama de en 2.45 (a) y 5.5 (b) GHz del elemento 2	32
Figura 42. Coeficiente de correlación de antena de dos elementos con barrera.	33
Figura 43. Ganancia de diversidad de antena de dos elementos con barrera.	33
Figura 44. Antena MIMO de 2 elementos perpendiculares construida.	34
Figura 45. Antena MIMO de 4 elementos paralelos construida: Coeficientes de Reflexión.	34
Figura 46. Antena MIMO de 2 elementos paralelos construida: Coeficientes de Acoplamiento.	35
Figura 47. Antena MIMO de 2 elementos paralelos construida: Coeficientes de Acoplamiento.	35
Figura 48. Antena MIMO de 2 elementos paralelos construida: Coeficientes de Acoplamiento.	35
Figura 49. Antena MIMO de 4 elementos construida: diagrama de en 2.45(a) y 5.5 (b) GHz del elemento 1	36
Figura 50. Antena MIMO de 4 elementos construida: diagrama de en 2.45 (a) y 5.5 (b) GHz del elemento 2	36
Figura 51. Antena MIMO de 4 elementos construida: diagrama de en 2.45 (a) y 5.5 (b) GHz del elemento 3	37
Figura 52. Antena MIMO de 4 elementos construida: diagrama de en 2.45 (a) y 5.5 (b) GHz del elemento 4	37
Figura 53. Antena MIMO de 4 elementos perpendicular con barrera construida.	38
Figura 54. Antena MIMO de 4 elementos perpendicular con barrera construida: Coeficientes de Reflexión.	38
Figura 55. Antena MIMO de 4 elementos perpendicular con barrera construida: Coeficientes de Acoplamiento.	39
Figura 56. Antena MIMO de 4 elementos perpendicular con barrera construida: Coeficientes de Acoplamiento.	39
Figura 57. Antena MIMO de 4 elementos perpendicular con barrera construida: Coeficientes de Acoplamiento.	39
Figura 58. d_ground_plane	I
Figura 59. Coeficiente de reflexión (d_ground_plane)	I
Figura 60. Coeficiente de acoplamiento (d_gorund_plane)	II
Figura 61. Variacion W_barrera2 en antena de 4 elementos	III
Figura 62. Coeficientes de Reflexión y Acoplamiento: variación W_barrerea2	III

Figura 63. Barrera círculos	III
Figura 64. Coeficientes de reflexión S11 de antena con barrera con círculos.....	IV
Figura 65. Coeficientes de Acoplamiento S2,1 de antena con barrera con círculos.....	IV
Figura 66. Coeficientes de Acoplamiento S3,1 de antena con barrera con círculos.....	V
Figura 67. Coeficientes de Acoplamiento S4,1 de antena con barrera con círculos.....	V
Figura 68. Antena MIMO 4 elementos barrera con rectángulos: medidas W_cuadrado, L_cuadrado.....	V
Figura 69. Coeficientes de Reflexión S1,1 de antena con barrera con rectángulos.....	VI
Figura 70. Coeficientes de Acoplamiento S2,1 de antena con barrera con rectángulos.....	VI
Figura 71. Coeficientes de Acoplamiento S3,1 de antena con barrera con rectángulos.....	VII
Figura 72. Coeficientes de Acoplamiento S4,1 de antena con barrera con rectángulos.....	VII
Figura 73. Antena MIMO 4 elementos barrera línea intermedia: medidas W_line_barrera	VII
Figura 74. Coeficientes de Reflexión S1,1 de antena barrera con línea intermedia.....	VIII
Figura 75. Coeficientes de Acoplamiento S2,1 de antena barrera con línea intermedia.....	VIII
Figura 76. Coeficientes de Acoplamiento S3,1 de antena barrera con línea intermedia.....	IX
Figura 77. Coeficientes de Acoplamiento S4,1 de antena barrera con línea intermedia.....	IX

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. 2.2.2. Descripción de los parámetros S para una red de 2 puertos.....	5
Tabla 2. 2.2.2. Parámetros de interés en circuitos.	6
Tabla 3. 4.2. Antena un elemento: Dimensiones.....	12
Tabla 4. 4.3.1 Antena dos elementos sin barrera: Dimensiones	14
Tabla 5. 4.3.2. Antena MIMO de 2 elementos con barrera: Medidas y distancias.....	15
Tabla 6. 4.4.2. Antena MIMO de 4 elementos con barrera: Medidas y distancias.	20
Tabla 7. 4.5.1. Antena MIMO de 4 elementos con barrera: Medidas y distancias.....	23
Tabla 8. Anexo A. Antena MIMO 2 elementos: medidas d_ground_plane.....	I
Tabla 9. Anexo B. Antena MIMO 4 elementos: medidas W_barrera2.....	III
Tabla 10. Anexo B. Antena MIMO 4 elementos barrera con círculos: medidas distancia_radios, radio círculo	IV
Tabla 11. Anexo B. Antena MIMO 4 elementos barrera con rectángulos: medidas W_cuadrado, L_cuadrado.....	VI
Tabla 12. Anexo B. Antena MIMO 4 elementos barrera con línea intermedia: medidas W_linea_barrera.	VIII

1. Introducción.

1.1. Motivación del proyecto.

Existe una creciente demanda en dispositivos que necesitan de conexiones vía Wi-Fi, Bluetooth, sistema de posicionamiento global (GPS) etc. Todas estas aplicaciones requieren distintas bandas de frecuencia para su funcionamiento, por lo que exige el uso de antenas multibanda.

El sistema de comunicación inalámbrica está plagado de múltiples limitaciones como el desvanecimiento, la capacidad del canal, la pérdida de bits, etc. Estas limitaciones han de ser tratadas a la hora del diseñar las antenas para los sistemas de comunicación inalámbrica.

La tecnología de antenas MIMO correspondiente a las siglas de “Multiple Input Multiple Output” (en español, Múltiple entrada, Múltiple salida) se refiere específicamente a la forma como son manejadas las ondas de transmisión y recepción en antenas para dispositivos inalámbricos. MIMO aprovecha fenómenos físicos como la propagación multitrayecto empleando múltiples antenas para transmisión y recepción, esto permite incrementar la tasa de transmisión y reducir la tasa de error sin aumentar el ancho de banda y la potencia transmitida. [1]

La tecnología MIMO ha sido considerada como una necesidad básica para los estándares de comunicación inalámbrica emergentes y futuros, incluidos IEEE 802.11n (Wi-Fi), IEEE 802.11ac (Wi-Fi), HSPA + (3G), WiMAX (4G) [2]

Todo este margen de mejora y el hecho que sea una tecnología emergente hace que la investigación en este tipo de tecnología sea algo motivante para hacer un trabajo fin de grado de antenas MIMO multibanda para su uso en una red WiFi.

1.2. Objetivos y enfoque.

En breves palabras MIMO aumenta la eficiencia espectral de un sistema de comunicación inalámbrica por medio de la utilización del dominio espacial. Así pues, hay muchas opciones para intentar una buena tasa de transmisión variando espacialmente las antenas, en este TFG nos centraremos en antenas fabricadas mediante tecnología impresa. Esta tecnología está ampliamente extendida gracias a su bajo coste de fabricación, repetitividad y perfil plano.

Los objetivos que se buscan con este trabajo son los siguientes:

- Diseño de un elemento que debe cubrir la banda asignada para la tecnología WiFi en España.
- Diseño de una agrupación de elementos utilizando alguno de los elementos unitarios anteriormente diseñados, variando su posición en busca de la mejor transmisión y menor interferencia entre elementos.
- Diseño de una barrera intermedia entre los elementos anteriormente mencionados que evite en mayor medida la interferencia entre elementos buscando un S21 menor a -15 dB.
- Diseño de una antena de 4 elementos usando la barrera y elemento anteriormente mencionado.
- Construcción y medición de los prototipos diseñados, comprobando así que lo diseñado en el ordenador se corresponde con funcionamiento real

Para la simulación de los diseños se utilizará software comercial específico de antenas, para su construcción se ha usado el laboratorio de Circuitos Impresos de la EPS de la Universidad Autónoma de Madrid y para su medición los instrumentos prestados por el laboratorio de RFCAs de la UAM.

1.3. Organización de la memoria.

En esta memoria se comenzará hablando de los fundamentos teóricos de las antenas haciendo hincapié en los parámetros básicos que se han usado a lo largo del TFG.

A continuación, se hablará brevemente de la tecnología WiFi y sus características, así como los criterios de diseño necesarios para el diseño de nuestras antenas.

Seguidamente, nos centraremos en el diseño por ordenador de las antenas siguiendo los criterios anteriormente mencionados, se analizarán y probarán varios tipos de antenas jugando con los distintos parámetros hasta obtener la idónea.

El siguiente paso será medir y analizar los resultados de las antenas construidas y comparar los resultados reales con los resultados de las simulaciones por ordenador.

Finalmente, se indican las conclusiones obtenidas a lo largo del desarrollo del TFG, así como posibles mejoras en trabajos futuros.

2. Fundamentos teóricos de antenas y tecnología WiFi.

2.1. Definición de antena.

El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) define una antena como aquella parte de un sistema transmisor o receptor diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas (IEE Std. 145-1983) [3].

Para poder extraer información se ha de ser capaz de captar en algún punto del espacio la onda radiada, absorber energía de esa onda y entregarla al receptor. Existen, pues, dos misiones básicas de una antena: transmitir y recibir, imponiendo cada aplicación condiciones particulares sobre la direccionalidad de la antena, niveles de potencia que debe soportar, frecuencia de trabajo y otros parámetros que se definirán posteriormente.

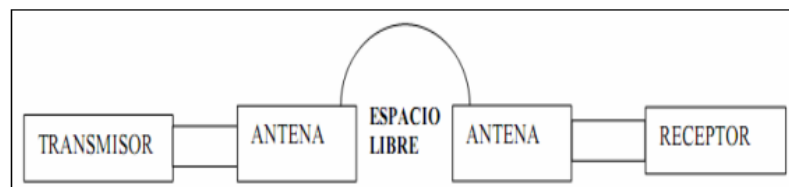


Figura 1. Diagrama de bloques: transmisor-receptor

Toda onda se caracteriza por su frecuencia de trabajo (f) y su longitud de onda (λ), ambas relacionadas por la velocidad de propagación en el medio, que habitualmente en antenas tiene la propiedad del vacío ($c=3 \cdot 10^8$ m/s).

$$c=\lambda \cdot f \quad (1)$$

Las características de las antenas dependen de la relación entre sus dimensiones y la longitud de onda de la señal de radiofrecuencia transmitida o recibida.

Las antenas tienen unas características de impedancia y de radiación que dependen de la frecuencia, y donde para cada aplicación y banda de frecuencias presentan características peculiares que dan origen a unas tipologías de antenas

2.2. Parámetros básicos.

Puesto que una antena formará parte de un sistema más amplio interesará caracterizarla con una serie de parámetros que la describan y permitan evaluar el efecto sobre el sistema de una determinada antena, o bien especificar el comportamiento deseado de una antena para incluirla en ese sistema.

En este capítulo se pretende hacer una introducción básica a las características más relevantes de una antena. [3]

2.2.1. Impedancia de entrada.

A la entrada de la antena puede definirse la impedancia de entrada Z_e mediante relaciones tensión-corriente que presenta en su terminal. Consta de una parte real, $R_a(\omega)$ y una parte imaginaria (reactancia), $X_a(\omega)$ dependientes de la frecuencia.

$$Z_a = R_a(\omega) + jX_a(\omega) \quad (2)$$

Puesto que la antena radia energía, hay una pérdida neta de potencia hacia el espacio debida a la radiación. Superpuestas a las de radiación tenemos las pérdidas que pueden producirse en la antena (habitualmente óhmicas en los conductores). Por ello la parte real se puede descomponer como $R_a(\omega) = R_r + R_L$, donde R_r es la resistencia de radiación y R_L la resistencia de pérdidas óhmicas.

La potencia entregada a la antena es la suma de las potencias radiada, P_r , y de pérdidas en la antena, P_L :

$$P_r = \frac{1}{2} |I_0|^2 R_r, \quad (3)$$

$$P_L = \frac{1}{2} |I_0|^2 R_L, \quad (4)$$

donde I_0 es el valor de la corriente de entrada de la antena.

2.2.2. Parámetros S.

Las antenas, como circuitos de microondas que son, pueden caracterizarse también como una red de dos puertos (Figura 2), donde uno de ellos es el puerto físico de entrada de la antena (típicamente de valor 50Ω) y el otro es un puerto físico de radiación.

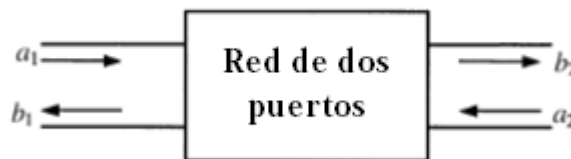


Figura 2. Esquema de una red de dos puertos con ondas incidentes y reflejadas asociadas.

Los circuitos de microondas pueden caracterizarse de diversas formas: matrices de impedancia Z , matrices de admitancia Y , etc. Sin embargo, normalmente se utilizan los parámetros de dispersión o parámetros S (válidos a cualquier frecuencia), que se basan en los niveles de potencia que se perciben en los terminales de los dos puertos sin ningún tipo de consideración adicional.

En la Figura 2 se muestra una red con ondas incidentes y reflejadas en los dos puertos.

Por convención, a_i representa la onda incidente y b_i la onda reflejada en el puerto i . Las ondas incidentes se dirigen en dirección entrante al circuito y las reflejadas, por el contrario, en dirección saliente.

En el caso de un circuito de dos puertas existen cuatro parámetros S y las relaciones entre sus ondas incidentes y reflejadas están definidas de la siguiente forma:

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \quad (6)$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \quad (7)$$

Para calcular el parámetro de dispersión S_{ji} es necesario que todos los accesos de la red se carguen con sus respectivas impedancias características a excepción del puerto i -ésimo en el que se colocará un generador que produzca una onda incidente a_i .

$$S_{ji} = \left(\frac{b_j}{a_i} \right)_{a_k=0 (\forall k \neq i)} \quad (8)$$

A continuación, se presenta una tabla con el significado de cada parámetro S de una red de dos puertos:

Tabla 1. 2.2.2. Descripción de los parámetros S para una red de 2 puertos

Parámetro	Coefficiente	Descripción	Fórmula
S_{11}	Reflexión a la entrada	Cantidad de potencia reflejada en el puerto 1 cuando se genera una onda incidente en dicho puerto.	$S_{11} = \left(\frac{b_1}{a_1} \right)_{a_2=0}$
S_{12}	Transmisión o ganancia inversa	Cantidad de potencia que llega al puerto 1 alimentando la red por el puerto 2.	$S_{12} = \left(\frac{b_1}{a_2} \right)_{a_1=0}$
S_{21}	Transmisión o ganancia directa	Cantidad de potencia que llega al puerto 2 alimentando la red por el puerto 1.	$S_{21} = \left(\frac{b_2}{a_1} \right)_{a_2=0}$
S_{22}	Reflexión a la salida	Cantidad de potencia que se refleja en el puerto 2 cuando se genera una onda incidente en dicho puerto.	$S_{22} = \left(\frac{b_2}{a_2} \right)_{a_1=0}$

A partir de estos parámetros S se pueden definir ciertos parámetros de interés que serán de utilidad para obtener determinadas características del circuito:

Tabla 2. 2.2.2. Parámetros de interés en circuitos.

Parámetro	Fórmula
$ S_{ii} ^2$	$ S_{ii} ^2 = \frac{\text{Potencia reflejada puerta } i}{\text{Potencia disponible puerta } i}$
$ S_{ji} ^2$	$ S_{ji} ^2 = \frac{\text{Potencia entregada en puerta } j}{\text{Potencia disponible en puerta } i}$
Pérdidas de retorno	$IR(dB) = -20 \log (S_{ii})$
Pérdidas de inserción	$IL(dB) = -20 \log (S_{ji})$

2.2.3. Diagrama de radiación.

El diagrama de radiación es una representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena a una distancia fija y en función de las diferentes direcciones del espacio. Si se observa a gran distancia una antena, se vería su radiación como si proviniera de un punto, conocido como centro de fase de la antena.

En las antenas se puede definir el plano E como el que forman la dirección de máxima radiación y el campo eléctrico en dicha dirección. Análogamente, el plano H es el formado por la dirección de máxima radiación y el campo magnético en dicha dirección. Ambos planos son perpendiculares y su intersección determina la línea que define la dirección de máxima radiación de la antena.

Es cierto que la radiación es tridimensional, pero en muchos casos puede ser especialmente interesante (y suficiente) representar un corte del diagrama. Estos cortes pueden hacerse de múltiples formas, aunque los más habituales son los que siguen los meridianos en una esfera hipotética (cortes para ϕ constante) o bien los paralelos (cortes con θ constante).

Desde el punto de vista del servicio que presta la antena, se puede hablar de tres tipos de diagramas (Figura 3): isotrópico, omnidireccional y directivo. Una antena isótropa es una antena ideal que radia la misma intensidad de radiación en todas las direcciones del espacio. Se dice que un diagrama de radiación es omnidireccional si presenta simetría de revolución en torno a un eje.

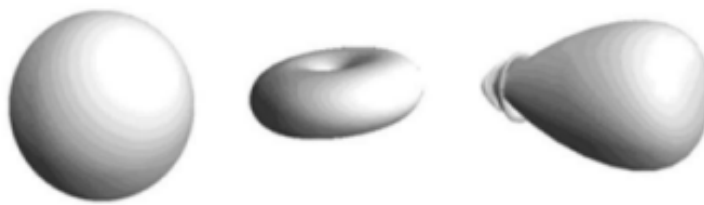


Figura 3. Diagramas de radiación isotrópico (izquierda), omnidireccional (centro) y directivo (derecha).

2.3. Teoría microstrip.

La línea microstrip es un tipo de línea de transmisión que se utiliza para transmitir señales de microondas. Consiste en una pista conductora de espesor t y anchura w (tira metálica muy fina respecto a longitud de onda que se propaga por ella), colocada en un lado de un sustrato dieléctrico que tiene una altura h y constante dieléctrica ϵ_r , que tiene un plano de masa en el otro lado.

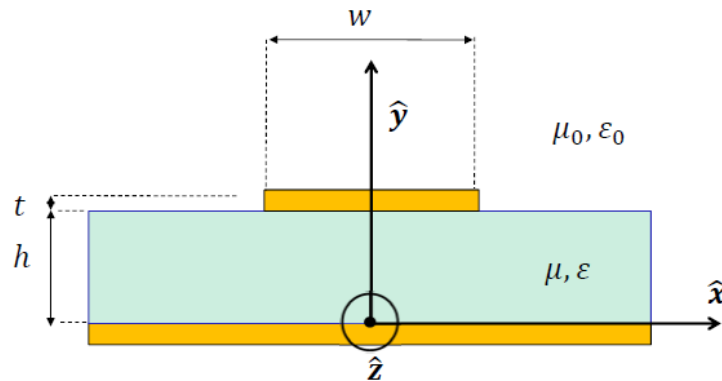


Figura 4. Estructura de línea microstrip

Una ventaja importante de utilizar esta línea es que las longitudes se reducen considerablemente comparadas con sus valores en el espacio libre debido al confinamiento de campos en el sustrato. Otra ventaja es que son mucho más baratas que la tecnología de guía de onda. Pueden ser construidas utilizando placas de circuito impreso (PCB) con materiales de bajo coste. Sin embargo, tienen poca capacidad para el manejo de energía y, normalmente, tienen mayores pérdidas que la tecnología tradicional.

2.3.1. Alimentación microstrip.

Una línea microstrip puede ser alimentada de diversas maneras por medio de conectores coaxiales (horizontal y vertical). Para las antenas de este TFG se utilizará una sonda coaxial horizontal.

Basta con conectar el conductor externo del coaxial al plano de masa y colocar el alma sobre la pista microstrip. Se trata de una transición de alimentación muy sencilla de construir. Sin embargo, puede provocar muchas pérdidas por radiaciones inesperadas hacia el exterior en aplicaciones de alta frecuencia al encontrarse el alma del conector desprotegida.

2.4. Tecnología WiFi.

2.4.1. Introducción.

En 1971 la Universidad de Hawaii, creó el primer sistema de conmutación de paquetes mediante una red de comunicación por radio, (ALOHA). Fue la primera red local inalámbrica (WLAN), desde entonces convivimos con las tecnologías inalámbricas de comunicación. Los inicios fueron muy desordenados, ya que cada fabricante desarrollaba sus propios modelos, incompatibles con los demás. En los años 90 se creó la WECA (Wireless Ethernet Compatibility), que en 2003 pasó a llamarse Wi-Fi Alliance, cuyo objetivo era el fomento de la tecnología WiFi y la creación de unos estándares para que los equipos fueran compatibles entre sí. Desde entonces, la tecnología WiFi ha experimentado un gran avance en velocidad de transmisión en rendimiento y en alcance.

2.4.2. Características.

El IEEE dispone de una extensa familia de estándares correspondientes a las redes de área local, la 802. Para el caso concreto de las redes sin hilos de alcance reducido, con coberturas de menos de 100 metros y capacidades de unos pocos Mbps, se creó la subfamilia de estándares nombrada 802.11, popularmente conocida como Wi-Fi. [4]

En cuanto a velocidad de transmisión de datos y de banda de frecuencia de uso, que de hecho son los dos parámetros principales del sistema, se han definido hasta ahora varios subestándares.

El subestandar 802.11n, es específico para la técnica MIMO y su característica principal es el uso de más de una antena en cada punto de acceso y en cada terminal, para poder aprovechar los "rebotes" (las interferencias provocadas por las reflexiones de la señal en paredes, edificios, etc) y combinarlos para obtener una señal mejor. Al mismo tiempo, se puede enviar más de una señal a la vez (diversas antenas). Combinando ambos efectos, se consigue una transmisión más eficaz y más robusta.

Las bandas de frecuencia utilizadas por los equipos Wi-Fi son las de 2,4 y 5 GHz, están clasificadas como uso común compartido. La caracterización como uso común permite que no sea necesario disponer de licencia de uso del espectro, sin embargo, tienen una serie de limitaciones como el alcance (derivados de la limitación de potencia) o la ausencia de protección frente a interferencias. Es el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencia (CNAF) el encargado de regular estas frecuencias.

La banda de frecuencia de 2,4 GHz es compartida por otras tecnologías (Bluetooth2 , Home RF3 , hornos microondas...) incrementando la posibilidad de congestionarla, por este motivo se decidió utilizar también la banda de los 5 GHz para aplicaciones de redes Wi-Fi. De alguna manera se puede decir que la banda de 2,4GHz es de uso común para propósito general y la de 5Ghz de uso común más orientada estrictamente a redes.

3. Criterios de diseño.

3.1. Introducción.

Nuestras antenas están diseñadas para ser utilizadas por tecnología WiFi, en este capítulo se tratarán aspectos importantes, teóricos y prácticos, que hay que tener en cuenta a la hora de diseñar las diferentes antenas como la banda de trabajo, parámetros de reflexión y acoplamiento, así como la caracterización del sustrato utilizado y el coeficiente de correlación y ganancia de diversidad. Además, habrá que tener en cuenta el tamaño de la antena, que será lo más reducida posible, ajustándose a los criterios de diseño.

3.2. Banda de trabajo, coeficiente de reflexión y acoplamiento.

Dado que nuestra antena esta diseñada para el uso de una red WiFi, uno de los criterios más importante es el espectro de banda que debe abarcar nuestra antena.

Una primera banda de 2,4 a 2,5 GHz procurando que el centro este en 2,45 y otra segunda banda que va de 5,1 a 5,9 GHz (a lo largo del TFG se hablar de una banda de 5-6 GHz, dado que hay que tener un pequeño margen).

Como se comentaba anteriormente, el S11 (Smm genéricamente hablando) hace referencia al coeficiente de reflexión, un parámetro que mide la cantidad de potencia reflejada en el puerto 1 cuando se genera una onda incidente en dicho puerto. Para obtener el máximo de eficacia de una antena WiFi es necesario que en las bandas de trabajo (2,4-2,5 y 5-6 GHz) este parámetro sea menor de -10 dB.

Como se observa en la Figura 5, el área verde será valido y el área roja no será valido

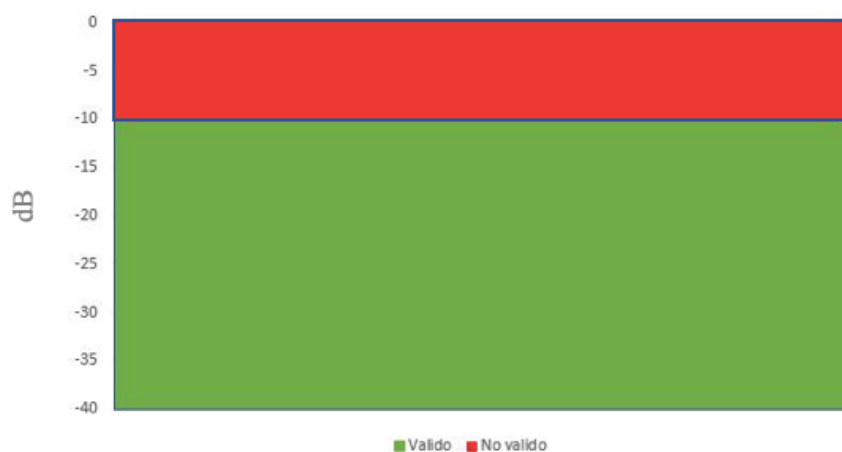


Figura 5. Criterio de validez para el coeficiente de reflexion

Otro criterio básico es el coeficiente de acoplamiento, al que nos referimos como S_{mn} que hace referencia a la cantidad de potencia que llega al puerto m alimentando la red por el puerto n. para obtener la mejor prestación para una antena MIMO, el parámetro S_{mn} tendrá que estar por debajo de los -15 dB. Cuanto menor sea el coeficiente de acoplamiento entre elementos, mejor será el aislamiento de nuestra antena, se ha usado el siguiente criterio para evaluar el grado de satisfacción.

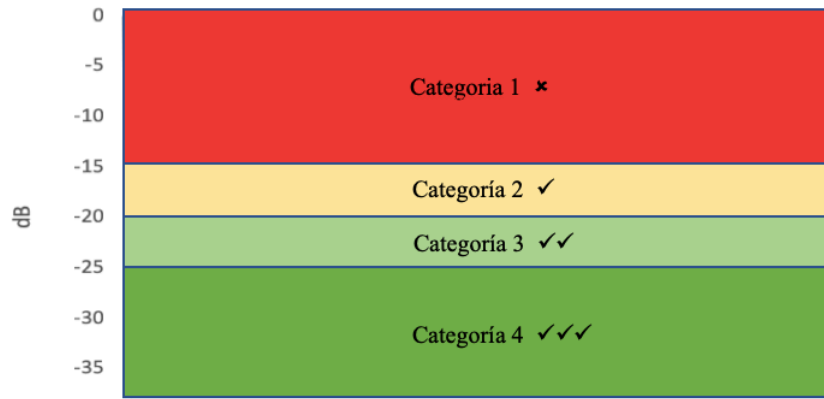


Figura 6. Grado de satisfacción del coeficiente de Acoplamiento

En la Figura 6 se observa que la categoría 1, entre 0 y -15 dB no sería válida y progresivamente las categorías 2 3 4 van siendo cada vez mejor.

3.3. Parámetros de los sustratos utilizados.

Para el diseño de las antenas en este TFG se ha usado un material dieléctrico RF35 de espesor $H=1.524$ mm y una constante dieléctrica $\epsilon_r=3.5$ con una tangente de pérdidas $\tan\delta=0.001$.

3.4. Coeficiente de correlación y ganancia de diversidad.

El éxito de los sistemas MIMO depende de la correlación entre los diferentes elementos de la antena. Existen diversos factores que afectan al ρ_{ecc} , tales como la distancia entre los elementos o la posición relativa en un entorno específico.

Una de las principales características de una antena MIMO es la ganancia de diversidad. La diversidad ayuda a eliminar los efectos nocivos del desvanecimiento ocasionados por el multitrayecto y depende del nivel de correlación entre las señales recibidas por los distintos elementos. Como se comenta anteriormente, para que una antena MIMO sea buena, el S_{11} (parámetro de reflexión del puerto) tiene que estar por debajo de -10 dB y su S_{12} (parámetro de acoplamiento entre puertos) por debajo de -15 dB, por lo tanto, según la fórmula (9), el parámetro de correlación entre elementos ρ_{ecc} tiene un límite superior (representando el caso peor) de 0.018 en la banda de trabajo.

La Ganancia de diversidad, al cumplir los dos criterios anteriormente mencionados, la G será próxima a 10 dB en la banda de trabajo.

$$\rho_{ecc} = \frac{|S_{11}^* S_{12} + S_{21}^* S_{22}|^2}{((1 - (|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2))(1 - (|S_{12}|^2 + |S_{22}|^2)))} \quad (9)$$

$$G_{dir} = 10 * \sqrt{1 - |\rho|^2}. \quad (10)$$

$$G = 10 * \log(G_{dir}) \quad (11)$$

4. Diseño del elemento.

4.1. Introducción.

En este TFG se realizará el diseño y simulación mediante el programa “CST studio” de una antena MIMO formada por varios (1, 2, 4) elementos simétricos impresos en una placa, este elemento actuará como un monopolo que se alimenta a través de una línea microstrip, de tal forma que cumplan con los requisitos anteriormente comentados. Este tipo de diseño en placas impresas son de bajo coste y permite realizar diseños de mayor ancho de banda aumentando la anchura del elemento del monopolo siendo muy utilizados en sistemas que van desde 3-10 GHz.

A continuación, se presentan los diferentes diseños y resultados de las simulaciones, hasta obtener el resultado que se buscaba.

4.2. Antena de un elemento.

Se parte de una primera idea basada en una antena de dos elementos en forma de U, con una línea de alimentación en común, el primer elemento de mayor tamaño radiaría a una frecuencia central de 2,44 GHz y el segundo elemento de menor tamaño para 5,5 GHz. Inicialmente uso las formulas teóricas para obtener una primera aproximación en cuanto al tamaño de la antena, para posteriormente modificar levemente los parámetros hasta obtener la radiación a la frecuencia deseada.

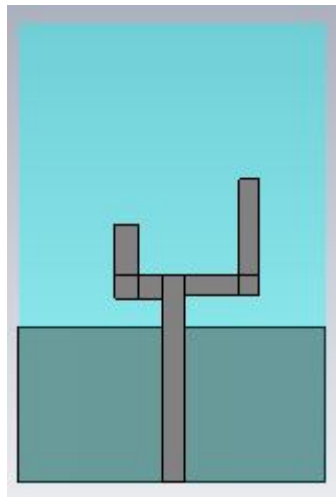


Figura 7. Primera aproximación antena de dos elementos

Simulando solamente el primer elemento se descubre que es capaz de radiar en las dos frecuencias deseadas, así pues, descarto la idea de hacer una antena de dos elementos para hacerla de tan solo uno.

Para calcular la anchura de la línea de alimentación, hay que tener en cuenta que los sistemas de telecomunicación trabajan con una impedancia de 50Ω por lo tanto la anchura será de 3,4 mm.

Para definir la anchura del elemento radiante se han probado diferentes anchuras hasta obtener la mas adecuada, que ha sido también de 3,4 mm.

Para simular el conector se añade un puerto normalizando los resultados a 50 Ohm

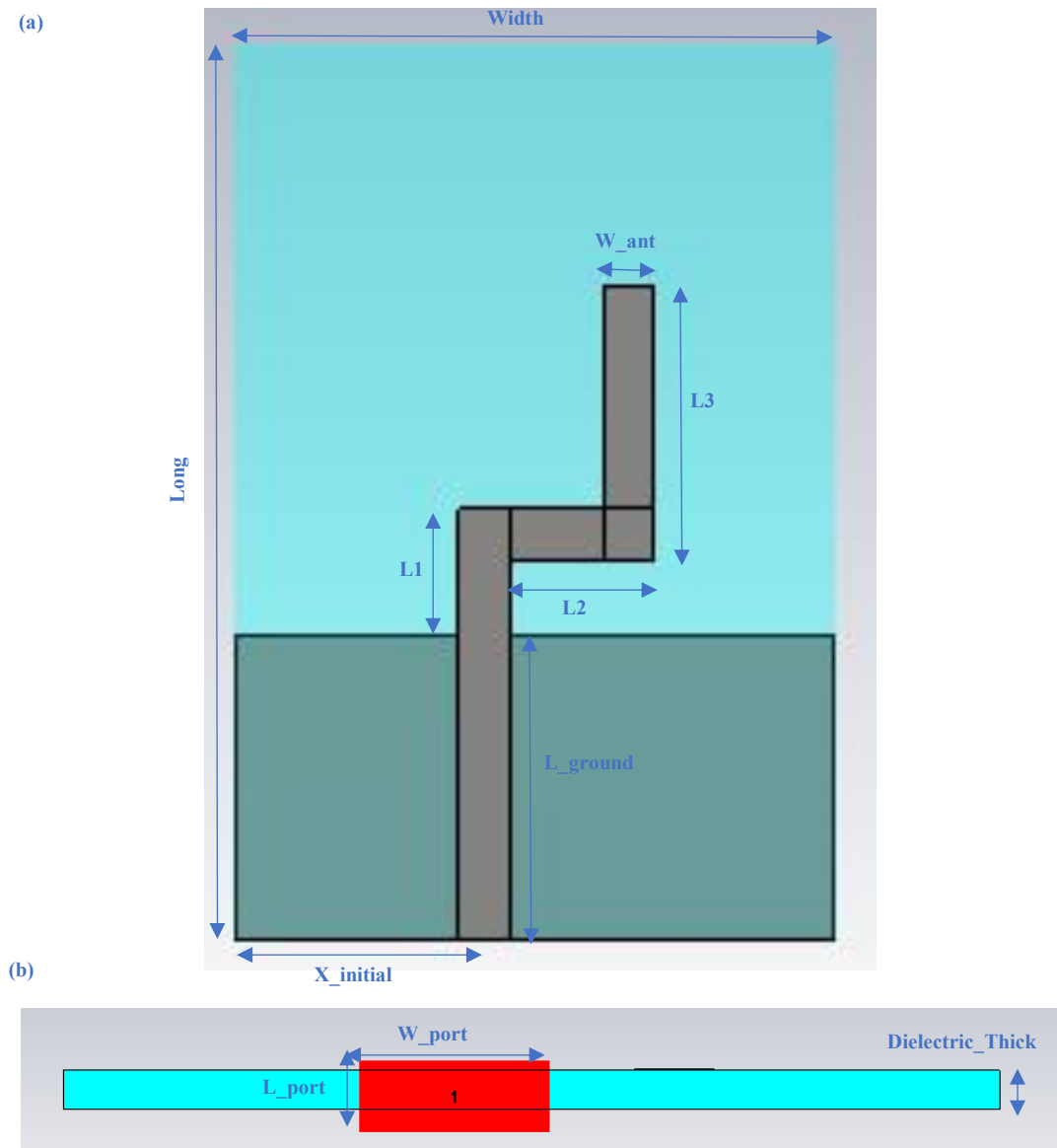


Figura 8 antena de un elemento: planta (a) alzado (b)

Tabla 3. 4.2. Antena un elemento: Dimensiones

Dimensiones	
PEC_Thick	0.03 mm
Dielectric_Thick	1. 524 mm
Width	39.5 mm
Long	59 mm
X_initial	28 mm
W_port	8mm
L_port	3 mm
W_ant	3.4 mm
L3	18 mm
L2	9.5 mm
L1	8.4 mm
L_ground	20 mm

Una vez normalizado a 50Ω se obtiene la siguiente figura:

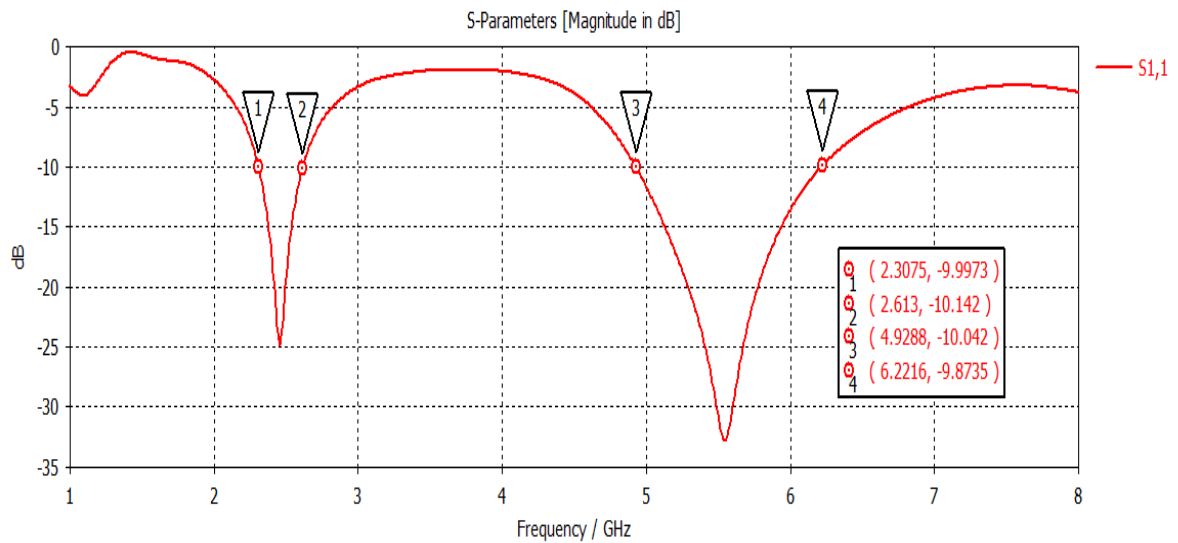


Figura 9. Antena WiFi un elemento: Coeficiente de Reflexión $S(1,1)$

Como se puede observar, la antena trabaja en las bandas deseadas con una S_{11} por debajo de -10 dB, cumpliendo los requisitos mencionados anteriormente.

4.3. Antena MIMO de 2 elementos.

4.3.1. Antena MIMO de 2 elementos sin barrera metálica.

Una vez obtenido un resultado bueno con un solo elemento, se procede a duplicarlo con el plano de masa con una ligera separación “D_{ground}” (ANEXO A) y con un “Width” lo mas pequeño posible, obteniendo la siguiente antena:

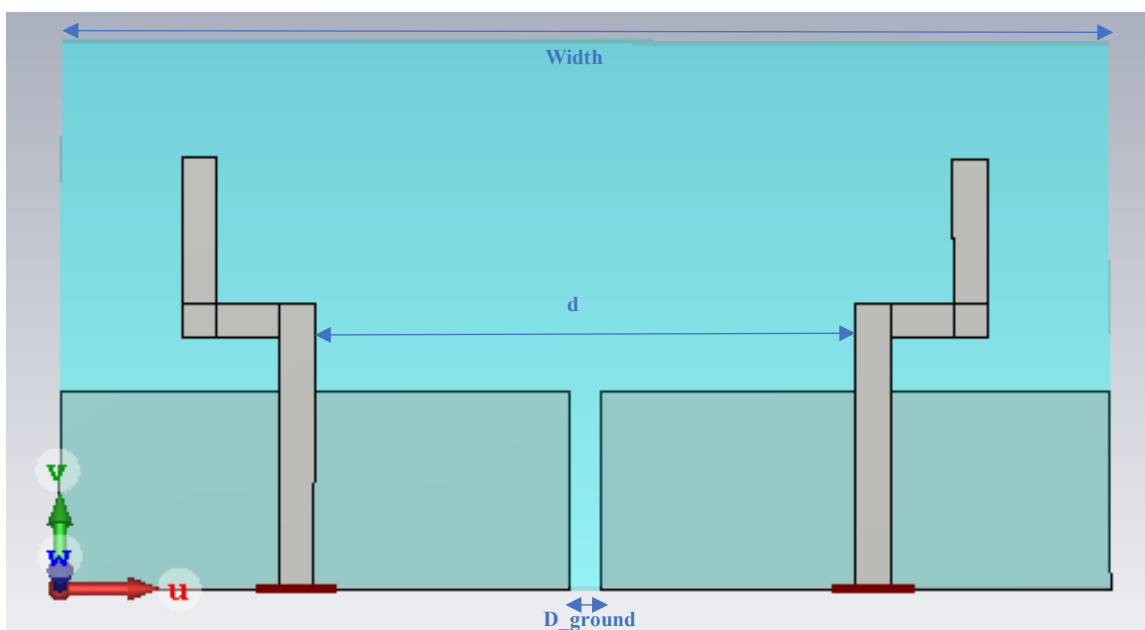


Figura 10. Antena MIMO de 2 elementos.

Tabla 4. 4.3.1 Antena dos elementos sin barrera: Dimensiones

Dimensiones	
Width	102 mm
D_ground	3 mm
d	52.6 mm

Tras añadir los puertos a cada uno de los conectores y normalizando a $50\ \Omega$, se obtiene los siguientes resultados en la simulación:

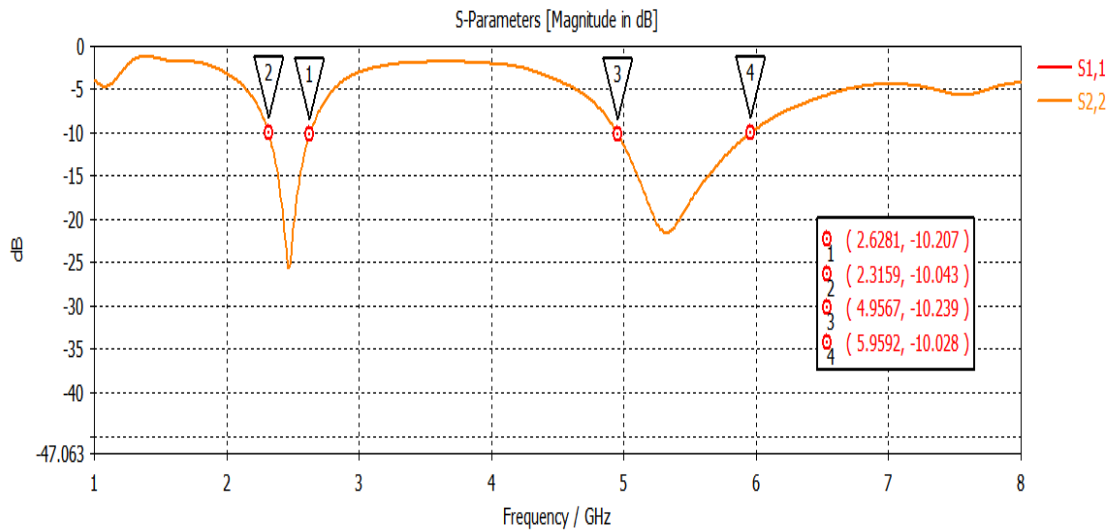


Figura 11. Antena MIMO de 2 elementos: Coeficientes de reflexión.

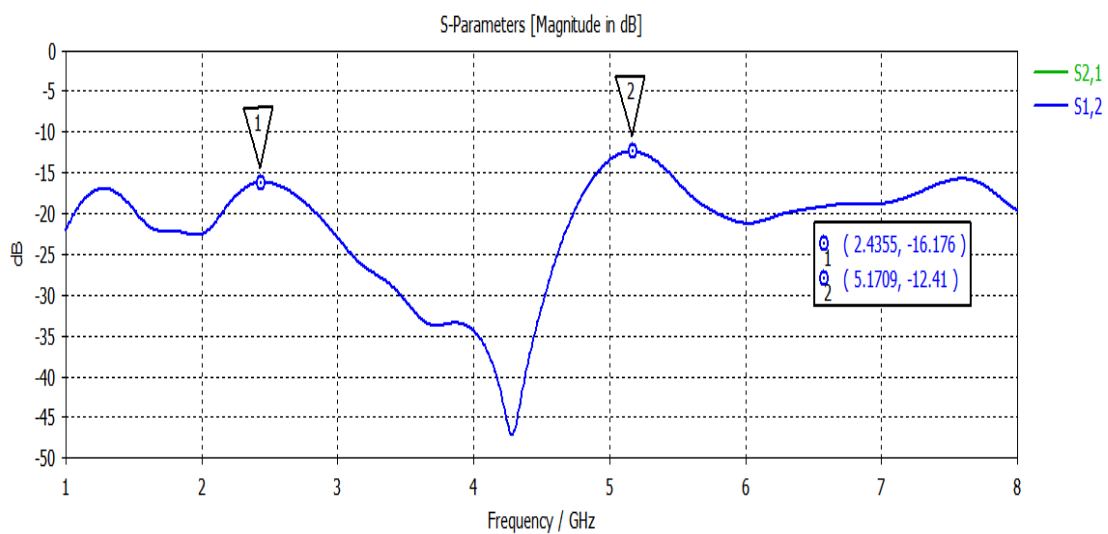


Figura 12. Antena MIMO de 2 elementos: Coeficientes de Acoplamiento.

Como se puede comprobar, los coeficientes de reflexión (S11 y S22) se encuentran por debajo de los -10 dB en todas las bandas deseadas. El problema en este caso viene dado por los coeficientes de acoplamiento (S12 y S21), situando los marcadores (1,2) en las zonas mas criticas de nuestras bandas de trabajo, se observa que sobrepasan ligeramente los -15 dB. Es obvio que cuanto mas distancia (d) entre los dos elementos, menor será el coeficiente de acoplamiento, sin embargo, un criterio importante del diseño es realizar una antena con el mínimo tamaño posible, así pues, se hace necesario el añadir una barrera metálica que mejore el aislamiento (reducir el S21 y S12).

4.3.2. Antena MIMO de 2 elementos con barrera metálica.

Una de las opciones para reducir el coeficiente de acoplamiento es incluir entremedias de los dos elementos una barrera metálica, que además no afecte mucho a los coeficientes de reflexión.

Tras probar distintas formas (ANEXO B) y anchuras de la barrera, se elige la configuración que se muestra en la Figura 13 con el objetivo de reducir al máximo la radiación entre elementos de la antena.

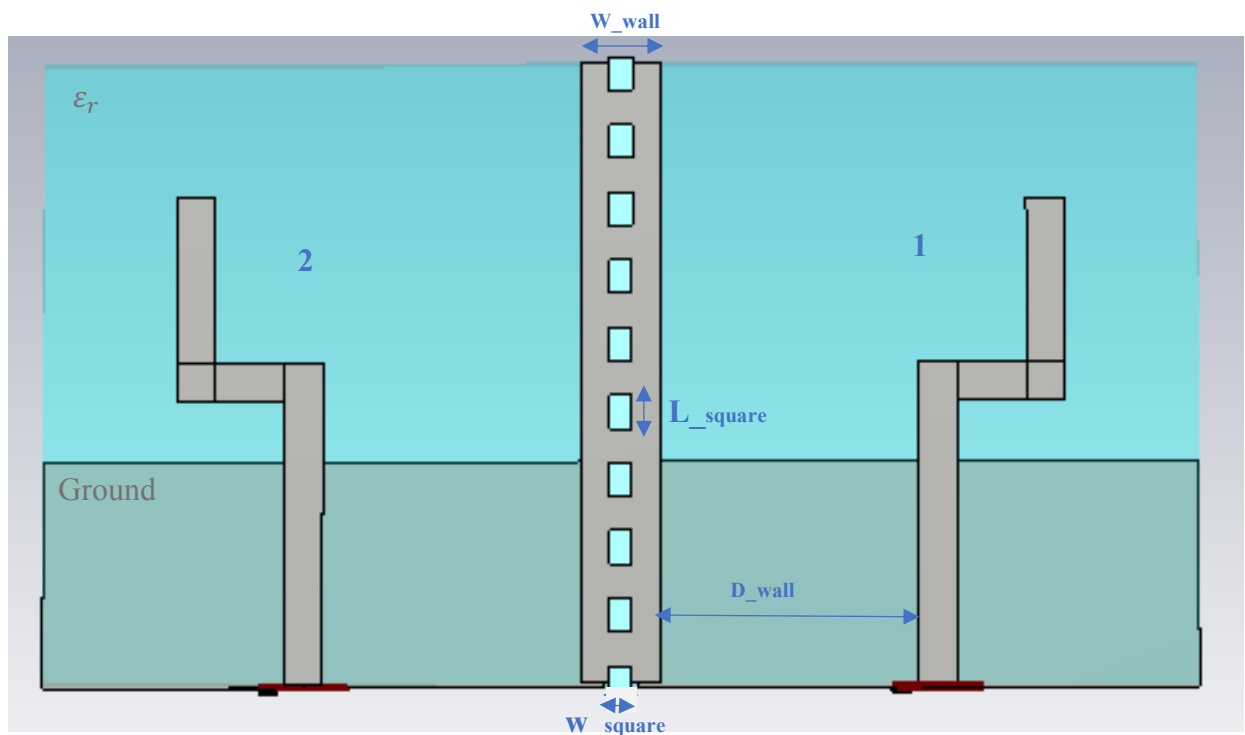


Figura 13. Antena MIMO de 2 elementos con barrera.

Tabla 5. 4.5.2. Antena MIMO de 2 elementos con barrera: Medidas y distancias.

Dimensiones	
W_wall	14 mm
W_square	2 mm
L_square	3 mm
D_wall	22.8 mm

Obteniendo los siguientes resultados:

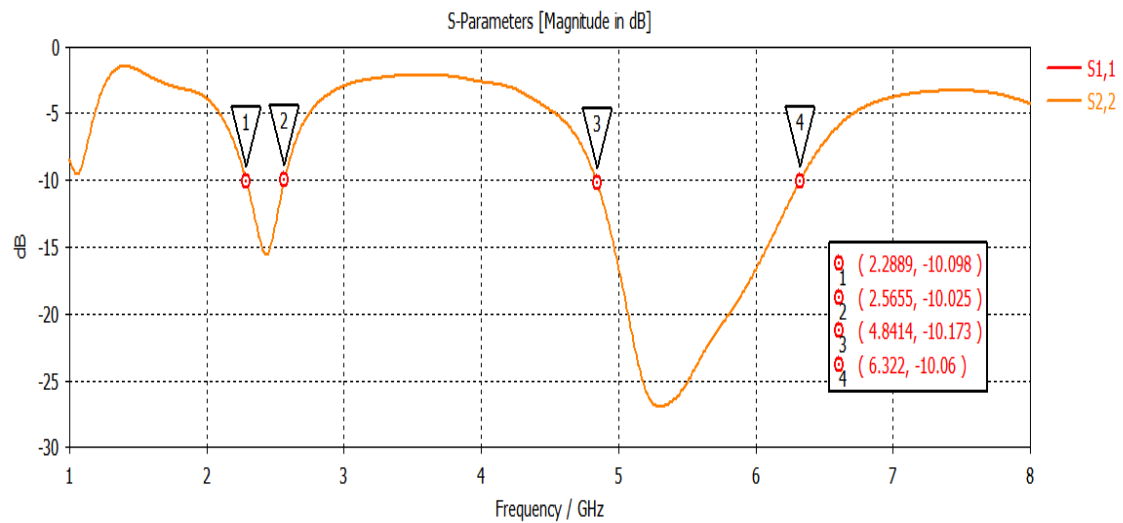


Figura 14. Antena MIMO de 2 elementos perpendiculares: Coeficientes de Reflexión.

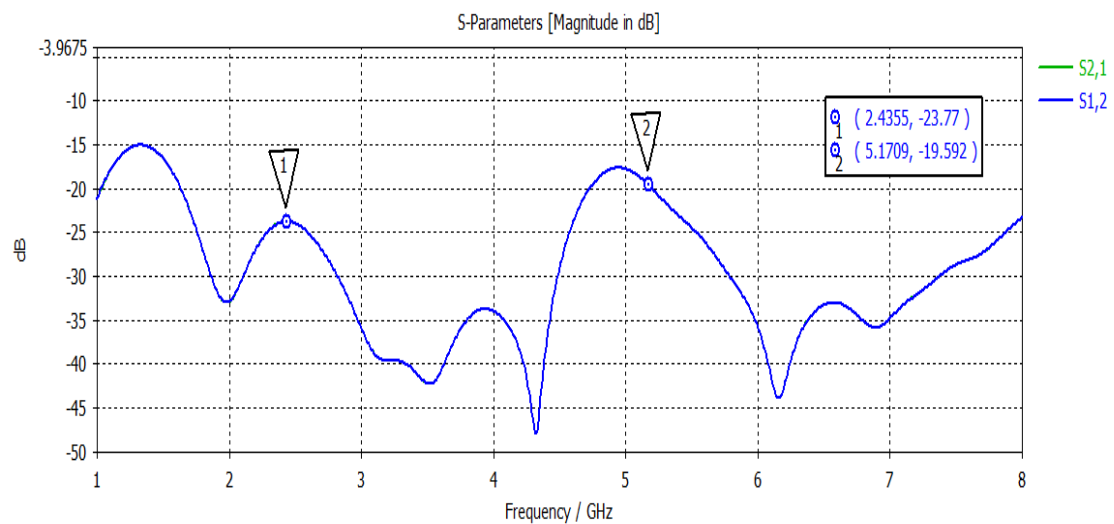


Figura 15. Antena MIMO de 2 elementos perpendiculares: Coeficientes de Acoplamiento.

En la Figura (14, 15) se aprecia que el coeficiente de reflexión se mantiene muy parecido al caso anterior sin barrera, sin embargo, el coeficiente de acoplamiento mejora notablemente, quedándose por debajo de los -20 dB (categoría 3) en la mayor parte de su espectro.

4.4. Antena MIMO de 4 elementos en paralelo.

4.4.1. Antena MIMO de 4 elementos en paralelo sin barrera.

Para obtener la mejor prestación de un sistema MIMO, es necesario maximizar el número de elementos transmisores y receptores. En nuestro caso por la falta de espacio llegaremos hasta 4 de elementos. Para el diseño de la nueva antena en CST, se aplica el modo “espejo” a la antena de dos elementos anteriormente diseñada, manteniendo sus dimensiones originales y obteniendo la siguiente configuración:

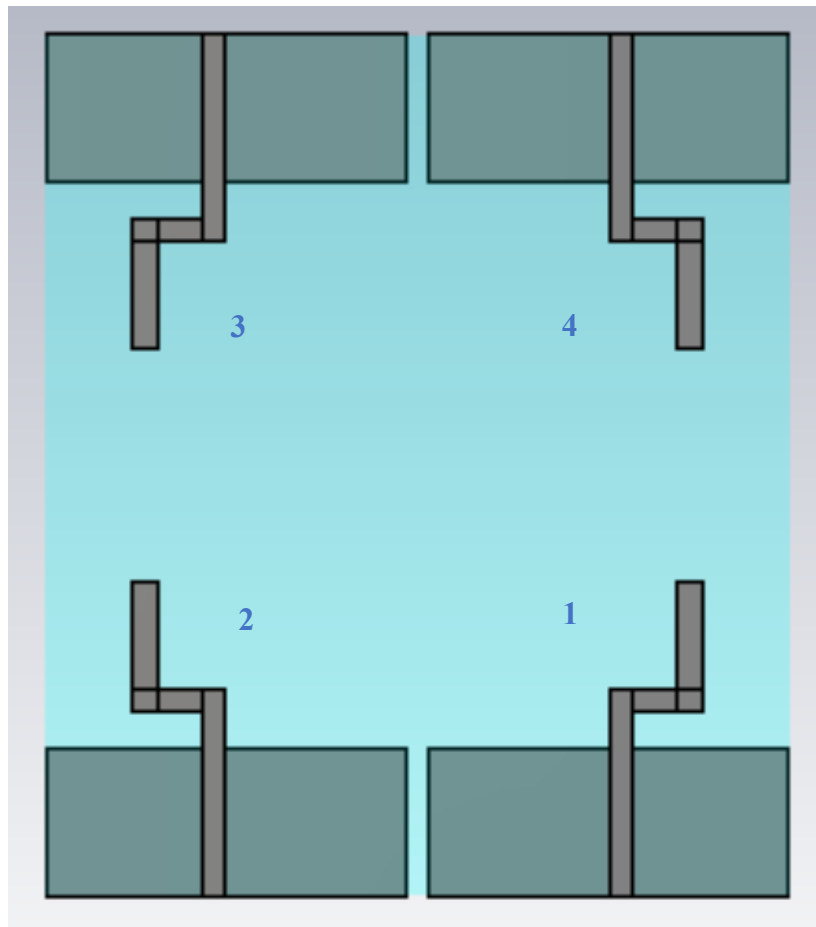


Figura 16. Antena MIMO de 2 elementos con barrera.

Tras simular normalizando a $50\ \Omega$ se obtienen los siguientes resultados. Se separan en cuatro gráficas para ver con mayor claridad los resultados.

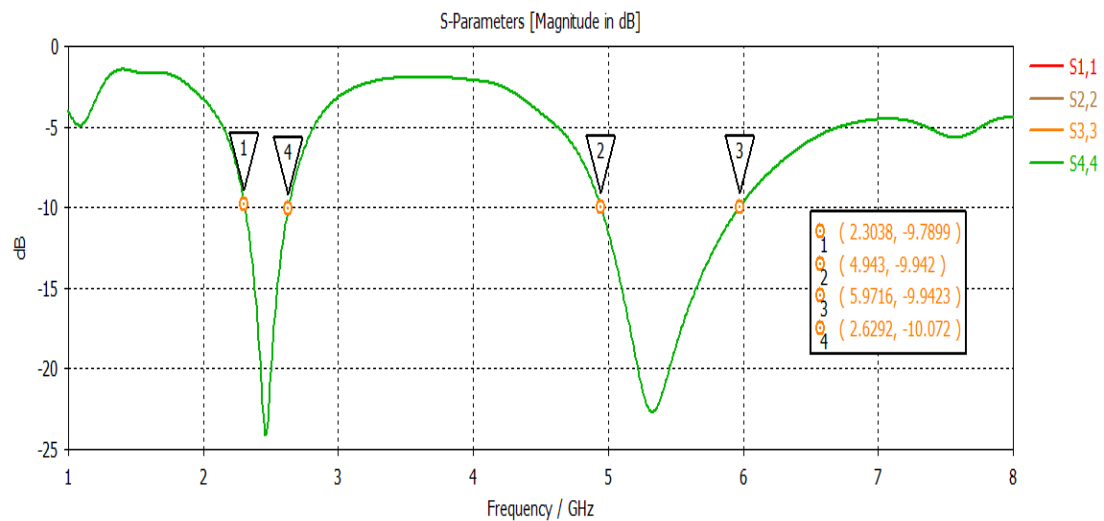


Figura 17. Antena MIMO de 4 elementos paralelos: Coeficientes de Reflexión.

Puesto que todos los elementos son iguales, sus coeficientes de reflexión también lo son, ambos siguen manteniéndose por debajo de -10dB en las dos bandas deseadas. A continuación, se muestra los distintos tipos de coeficientes de acoplamiento entre los cuatro elementos.

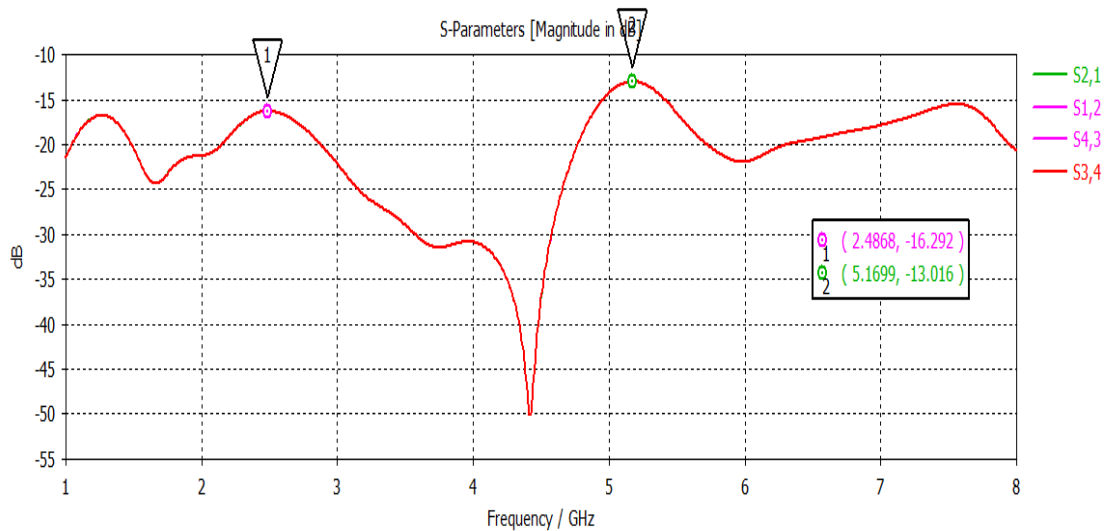


Figura 18. Antena MIMO de 4 elementos paralelos: Coeficientes de Acoplamiento $S_{2,1}$ $S_{1,2}$ $S_{4,3}$ $S_{3,4}$.

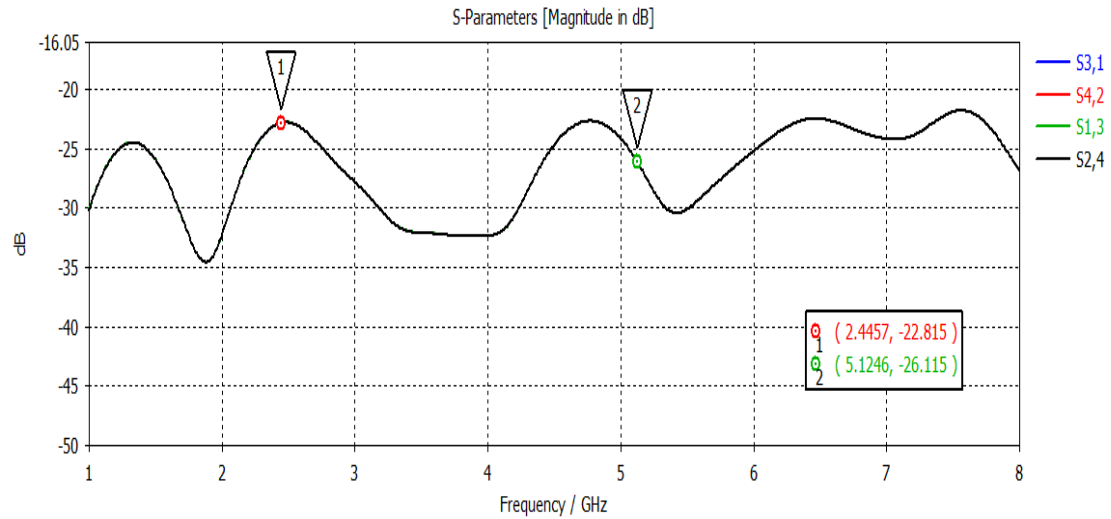


Figura 19. Antena MIMO de 4 elementos paralelos: Coeficientes de Acoplamiento $S_{3,1}$ $S_{4,2}$ $S_{1,3}$ $S_{2,4}$.

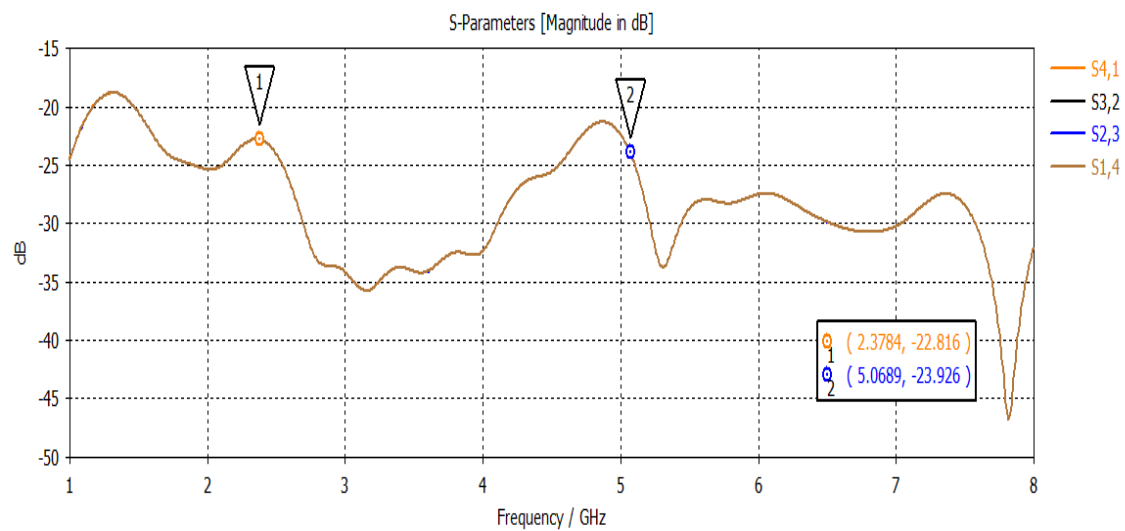


Figura 20. Antena MIMO de 4 elementos paralelos: Coeficientes de Acoplamiento $S_{4,1}$ $S_{3,2}$ $S_{2,3}$ $S_{1,4}$.

Al no contar con ninguna barrera de aislamiento, los coeficientes de acoplamiento no son validos para el caso de la Figura 18 (categoria1), y no son del todo bueno (categoria 2) en las Figura 19 y la Figura 20.

Se puede observar que los coeficientes de acoplamiento con peores resultados son los que se refieren a elementos próximos entre sí.

4.4.2. Antena MIMO de 4 elementos con barrera.

Tras el estudio anterior de cuatro elementos, se procede a añadirle una barrera metálica vertical igual a la realizada para el caso de dos elementos y creando dos nuevas barreras metálicas, una horizontal (con forma parecida a la vertical, pero distinta anchura) y otra cuadrada centrada en la antena.

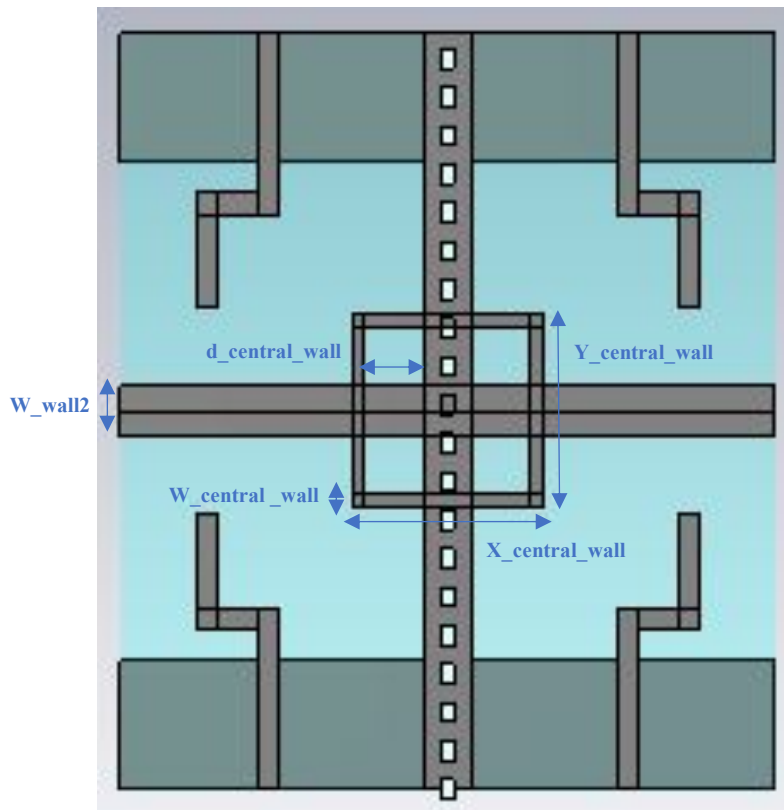


Figura 21. Antena MIMO de 4 elementos con barrera.

Tabla 6. 4.4.2. Antena MIMO de 4 elementos con barrera: Medidas y distancias.

Dimensiones	
W_wall2	16 mm
W_central_wall	2 mm
d_central_wall	9.5 mm
X_central_wall	30 mm
Y_central_wall	30 mm

Tras simular normalizando a 50 Ω se obtienen los siguientes resultados. Nuevamente se separan en cuatro gráficas distintas.

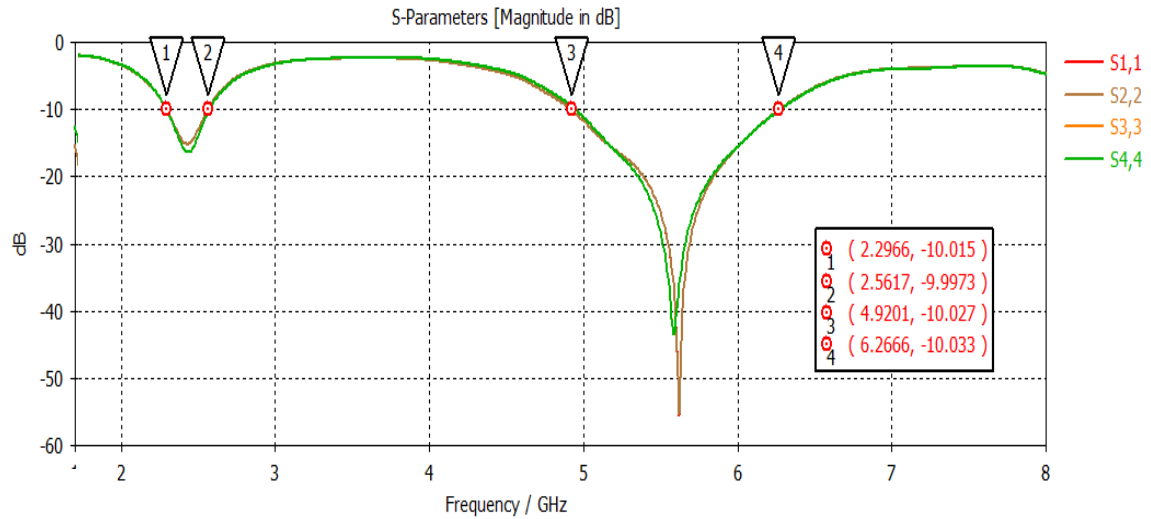


Figura 22. Antena MIMO de 4 elementos paralelos: Coeficientes de Reflexión.

Los coeficientes de reflexión son ligeramente distintos causado por el efecto de la barrera sobre ellos, sin embargo, se siguen manteniendo por debajo de -10 dB en ambas bandas

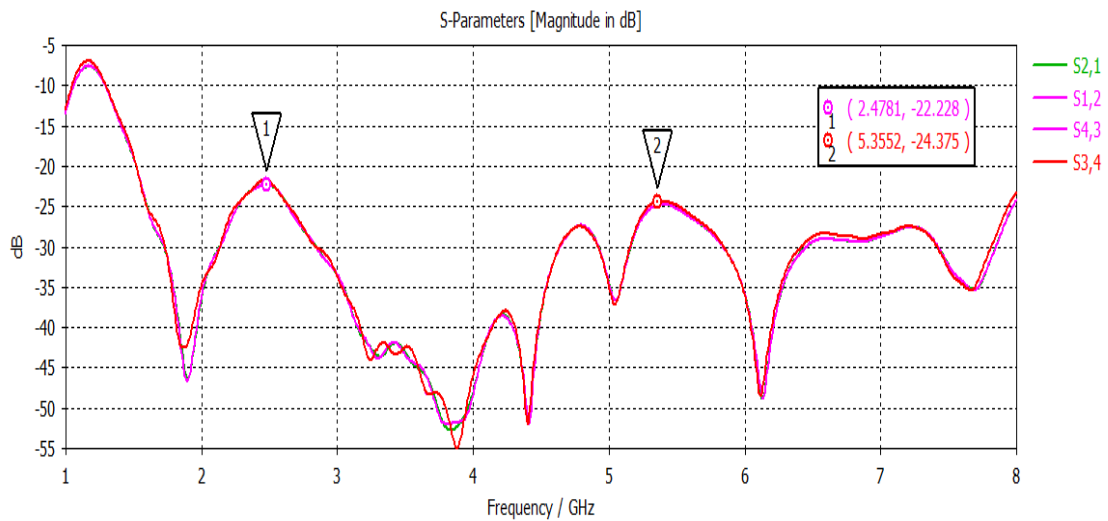


Figura 23. Antena MIMO de 4 elementos paralelos: Coeficientes de Acoplamiento S2,1 S1,2 S4,3 S3,4.

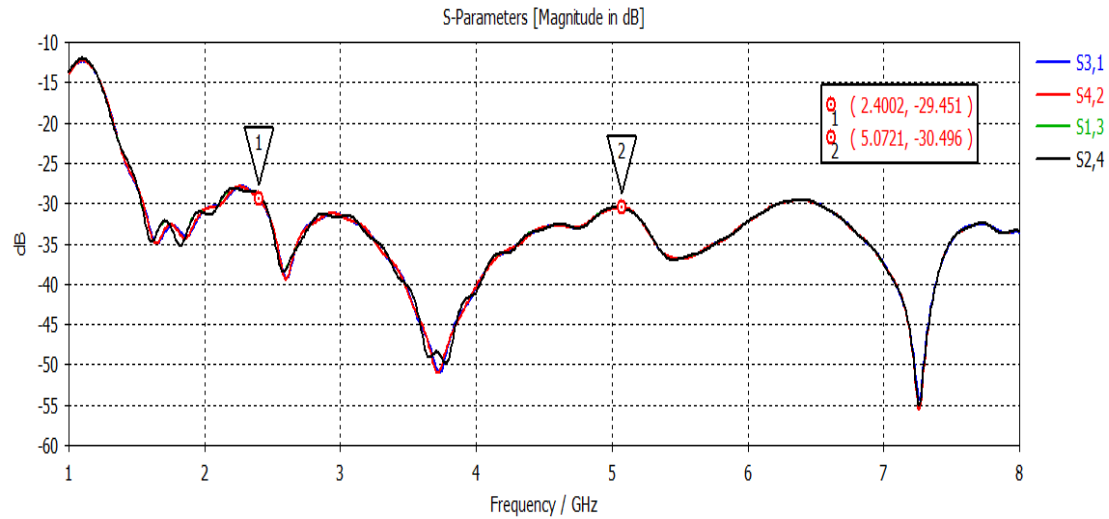


Figura 24. Antena MIMO de 4 elementos paralelos: Coeficientes de Acoplamiento $S_{3,1}$ $S_{4,2}$ $S_{1,3}$ $S_{2,4}$.

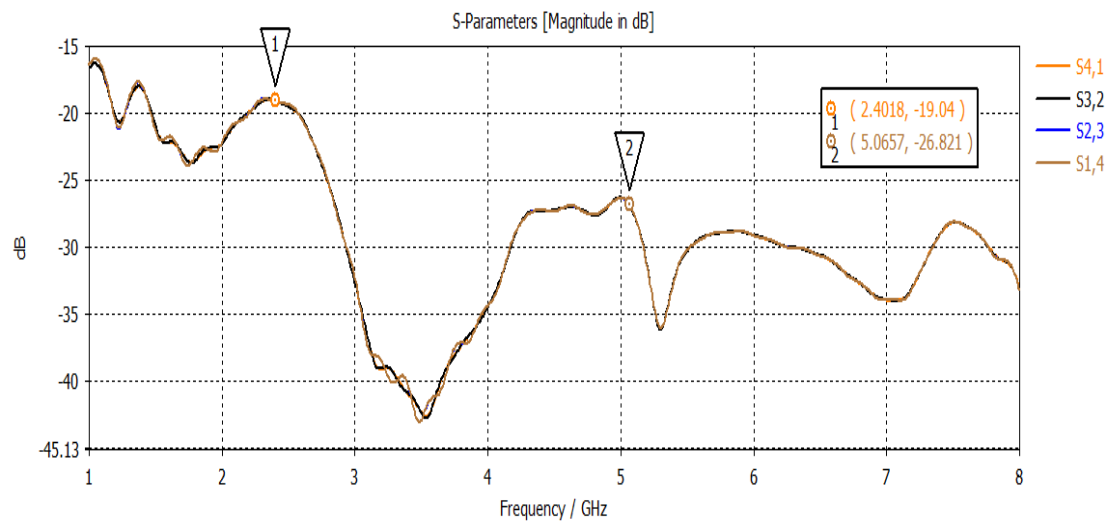


Figura 25. Antena MIMO de 4 elementos paralelos: Coeficientes de Acoplamiento $S_{4,1}$ $S_{3,2}$ $S_{2,3}$ $S_{1,4}$.

Por otro lado, los coeficientes de acoplamiento que se muestran en las Figuras (23 24 25), han mejorado notablemente respecto al caso sin barrera, se puede observar, como excepto para la banda de 2,4 para el caso de $S_{4,1}$ $S_{3,2}$ $S_{2,3}$ $S_{1,4}$ el resto de los coeficientes de acoplamiento esta por debajo de -20 dB, incluso de -25 dB (categorías 3 y 4).

4.5 Antena MIMO de 4 elementos perpendiculares.

4.5.1 Antena MIMO de 4 elementos perpendiculares sin barrera.

Manteniendo el mismo numero de elementos, esta vez se modifica la posición de ellos poniéndolos en perpendicular unos con otros, se hace necesario aumentar el tamaño de nuestra placa (un nuevo long) para que sea simétrico, al aumentar el tamaño, es evidente que será menor el coeficiente de acoplamiento entre elementos, por lo tanto, no es comparable con la antena anterior, sin embargo es otro prototipo que se ha querido diseñar.

La figura inicial que se muestra a continuación, con 4 planos de masa claramente diferenciados 4 puertos y 4 elementos todos ellos normalizados a 50 ohmios.

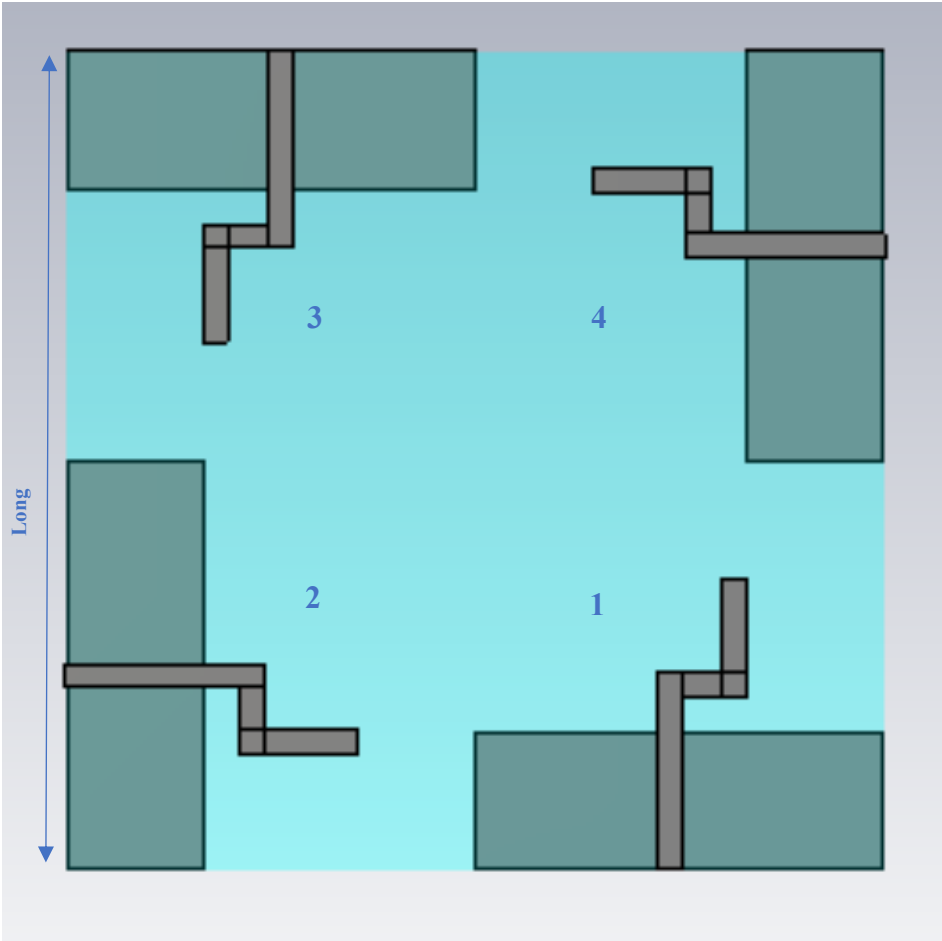


Figura 26. Antena MIMO de 4 elementos perpendiculares sin barrera.

Tabla 7. 4.5.1. Antena MIMO de 4 elementos con barrera: Medidas y distancias.

Dimensiones	
Long	118 mm

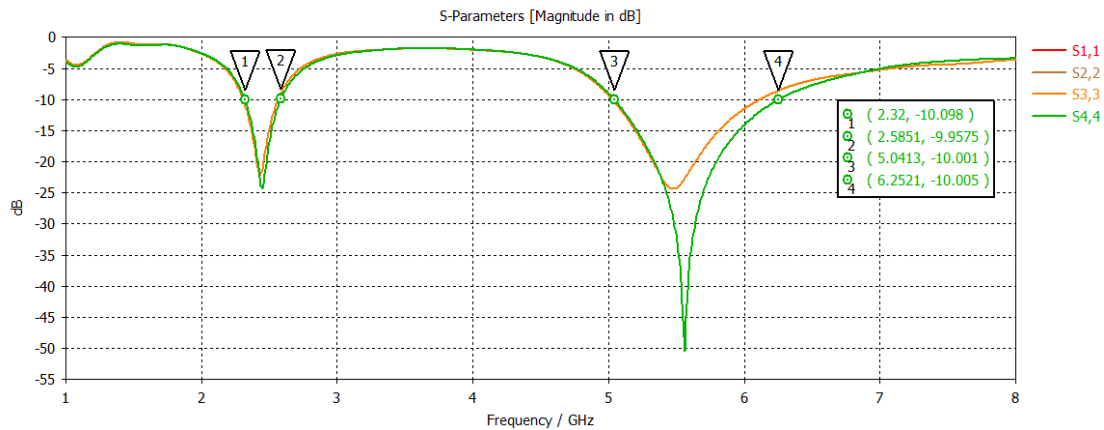


Figura 27. Antena MIMO de 4 elementos perpendiculares sin barrera: Coeficientes de Reflexión.

En este caso los coeficientes de reflexión son óptimos, todos ellos por debajo de -20 dB pero con una ligera diferencia entre ellos dos a dos, se puede ver como el S11 y el S33 son iguales, pero un poco distintos a S22 y S44.

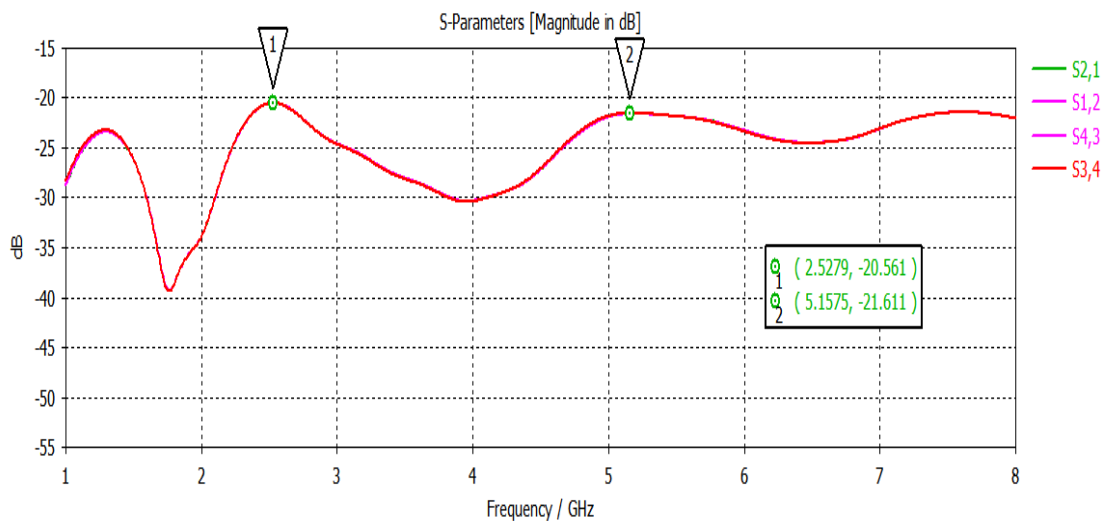


Figura 28. Antena MIMO de 4 elementos perpendiculares sin barrera: Coeficientes de Acoplamiento S2,1 S1,2 S4,3 S3,4.

Dado que la distancia entre elementos ha aumentado, esto se ve reflejado especialmente en los S2,1 S1,2 S4,3 S3,4 que eran los coeficientes mas críticos.

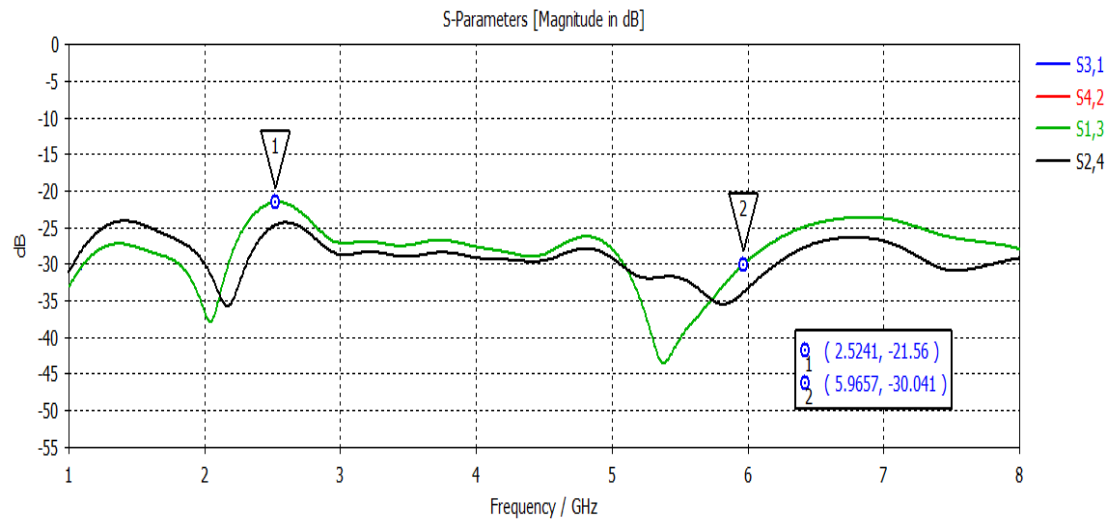


Figura 29. Antena MIMO de 4 elementos perpendiculares sin barrera: Coeficientes de Acoplamiento $S_{3,1}$ $S_{4,2}$ $S_{1,3}$ $S_{2,4}$.

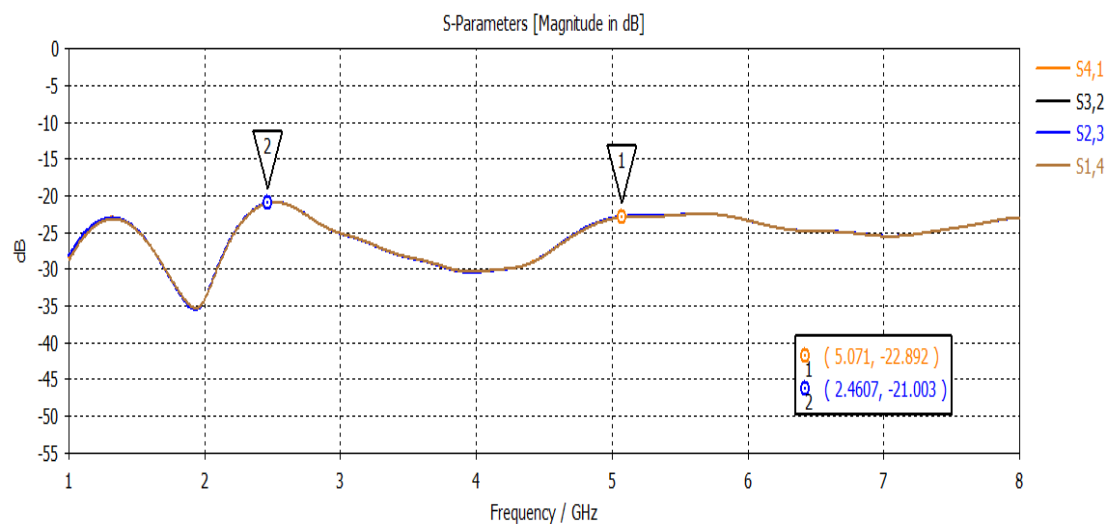


Figura 30. Antena MIMO de 4 elementos perpendiculares sin barrera: Coeficientes de Acoplamiento $S_{4,1}$ $S_{3,2}$ $S_{2,3}$ $S_{1,4}$.

Sin necesidad de incluir ninguna barrera, se puede ver como todos los coeficientes de reflexión cumplen sobradamente con nuestros requisitos (categorías 2 y 3)

4.5.1. Antena MIMO de 4 elementos perpendiculares con barrera.

Como ultima prueba, se decide añadir las barreras (esta vez sin la barrera central), en busca de un coeficiente de acoplamiento óptimo y por debajo de -25 dB en todo su rango de frecuencias.

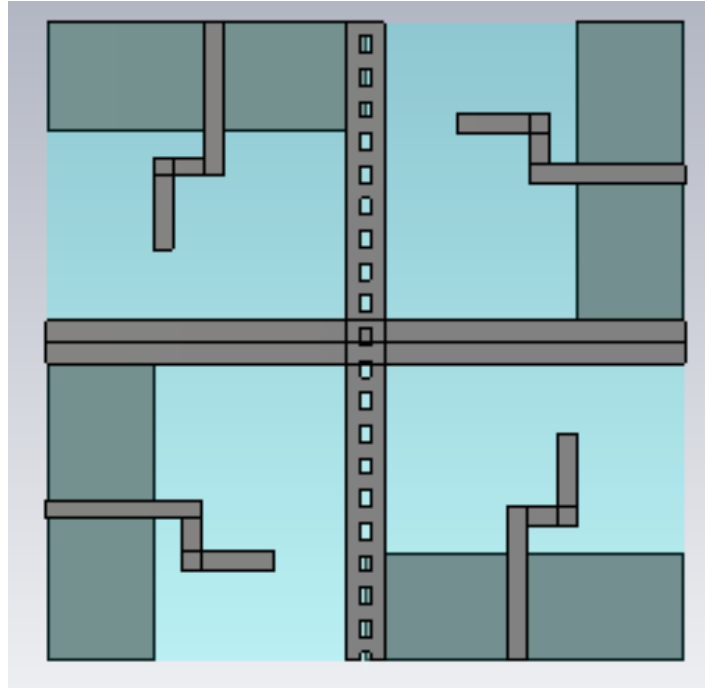


Figura 31. Antena MIMO de 4 elementos perpendiculares con barrera.

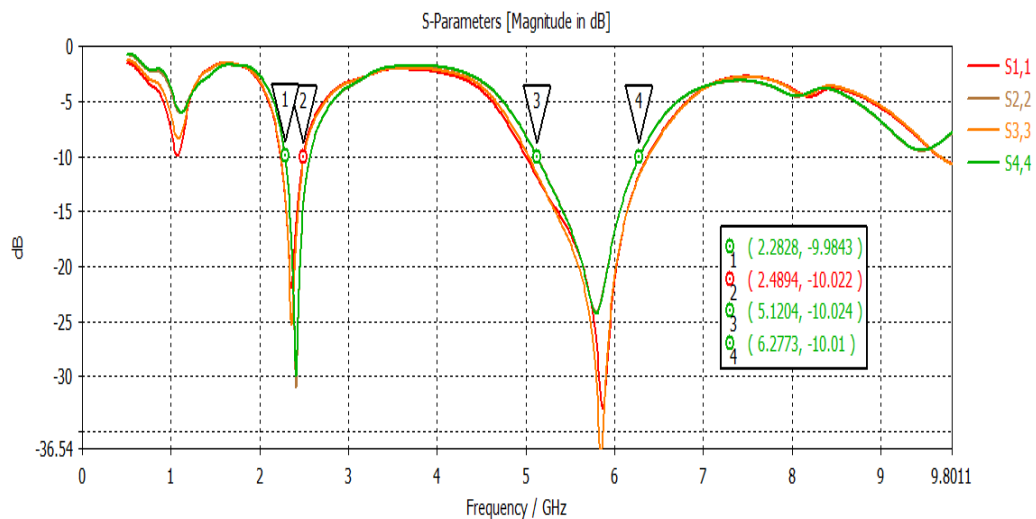


Figura 32. Antena MIMO de 4 elementos perpendiculares con barrera: Coeficientes de Reflexión.

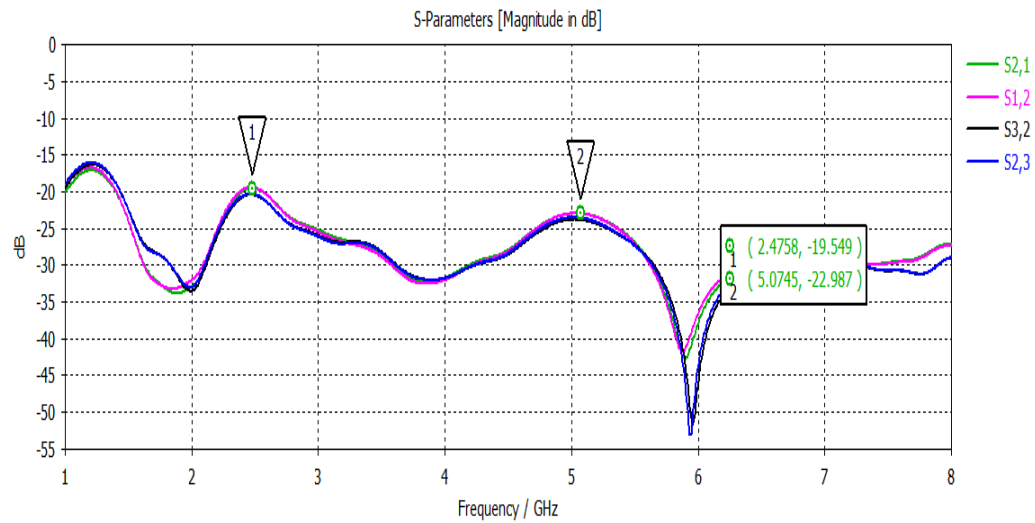


Figura 33. Antena MIMO de 4 elementos perpendiculares con barrera: Coeficientes de Acoplamiento $S_{2,1}$ $S_{1,2}$ $S_{4,3}$ $S_{3,4}$.

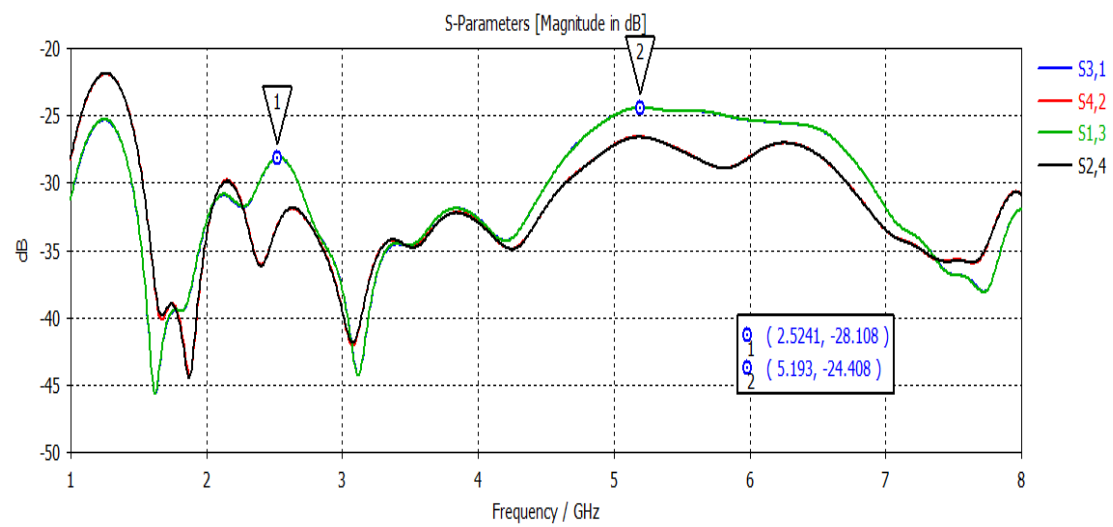


Figura 34. Antena MIMO de 4 elementos perpendiculares con barrera: Coeficientes de Acoplamiento $S_{3,1}$ $S_{4,2}$ $S_{1,3}$ $S_{2,4}$.

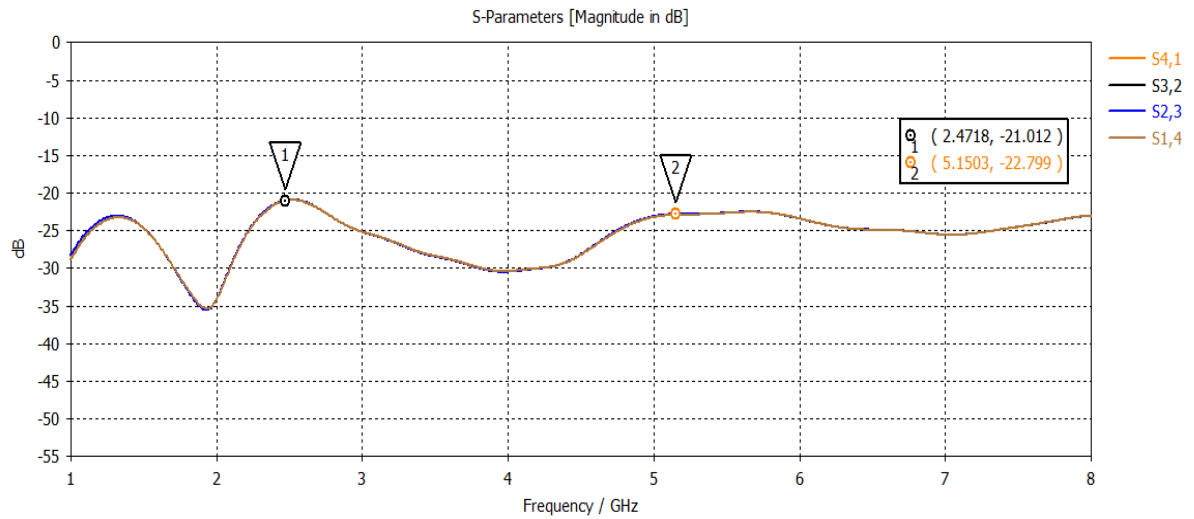


Figura 35. Antena MIMO de 4 elementos perpendiculares con barrera: Coeficientes de Acoplamiento $S_{4,1}$ $S_{3,2}$ $S_{2,3}$ $S_{1,4}$.

Como se puede observar hay mejoras en algunas frecuencias y peores resultados en otras, por lo tanto, no se puede concluir que la barrera metálica haya sido una buena solución para mejorar el aislamiento.

5. Resultados de las medidas.

Después del diseño de las antenas mediante ordenador se ha procedido a la fabricación de algunas de las antenas en el Taller de Circuitos Impresos de la Escuela Politécnica Superior de la UAM. Las cuatro antenas diseñadas han sido:

- Antena MIMO elemento unitario.
- Antena MIMO de 2 elementos con barrera.
- Antena MIMO de 4 elementos paralelos con barrera.
- Antena MIMO de 4 elementos perpendiculares con barrera.

Tras realizar la fabricación, se procede a soldar los conectores SMA a las pistas de las antenas, para posteriormente medirlas en el Analizador de Redes del grupo de RFCAS de la Escuela Politécnica Superior de UAM.

La banda usada con el analizar de redes ha sido de 1 GHz a 8 GHz, puesto que el resto de las frecuencias no nos importan para nuestro caso. Para poder medir los coeficientes de acoplamiento se han usado cargas de 50 Ohm a los conectores que no estaban siendo medidos.

Otra medida realizada son los diagramas de radiación, en este caso solo se han medido dos antenas (antena de dos elementos con barrera, antenna con cuatro elementos paralelos con barrera) en las frecuencias centrales de nuestras bandas de trabajo, es decir para 2.4 GHz y 5.5 GHz, para su medición se ha utilizado la cámara anecoica del grupo de RFCAS y tan solo se ha medido el plano H, puesto que es el que nos interesa analizar para comprobar que se trata de una antena lo mas omnidireccional posible, ya que el mecanismo para hacer la medida en el plano E estaba estropeado.

Los resultados obtenidos son los siguientes.

Por ultimo, se incluyen unas graficas de los coeficientes de correlación y ganancia de diversidad obtenidos de las medidas tomadas de las antenas fabricadas.

5.1. Antena MIMO elemento unitario.

Antena construida con conector soldado:

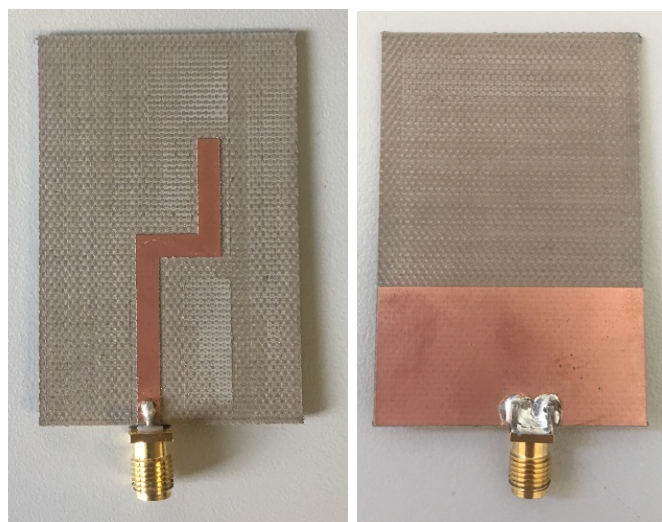


Figura 36. Antena elemento unitario construida

Se empleará el software ADS (Advanced Design System) para interpretar los resultados obtenidos del analizador de redes. Obteniendo los siguientes resultados:

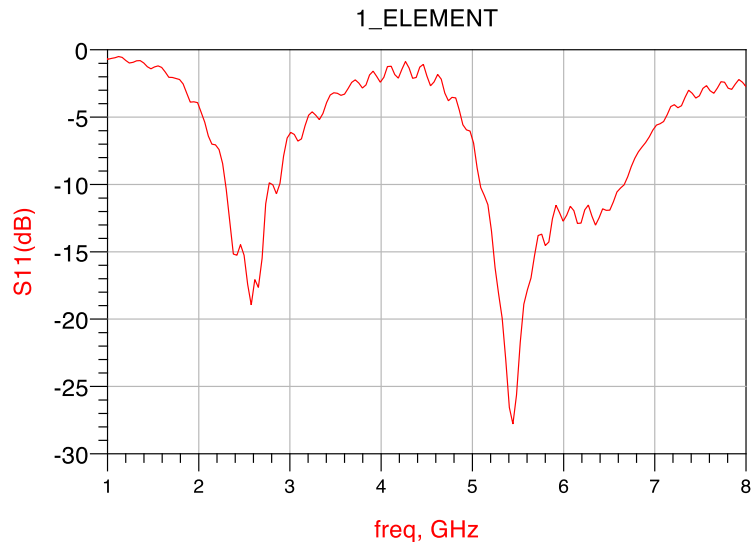


Figura 37. Antena elemento unitario construida: Coeficiente de Reflexión.

Se observa un rizado en toda la banda debido a las condiciones del entorno e interferencias externas, además de que los resultados obtenidos son ligeramente peores que los de simulación por otras causas como el uso de los cables empleados para conectar las antenas al analizador de redes o el tipo de soldadura del conector a la pista. Este tipo de errores se repetirá con el resto de los análisis realizados sobre las antenas construidas. Aun así, se puede decir que existen dos bandas por debajo de -10 dB claramente diferenciadas en las regiones mencionadas y dentro de los límites que se habían establecido.

5.2 Antena MIMO de 2 elementos con barrera.

Antena construida con conectores soldados:

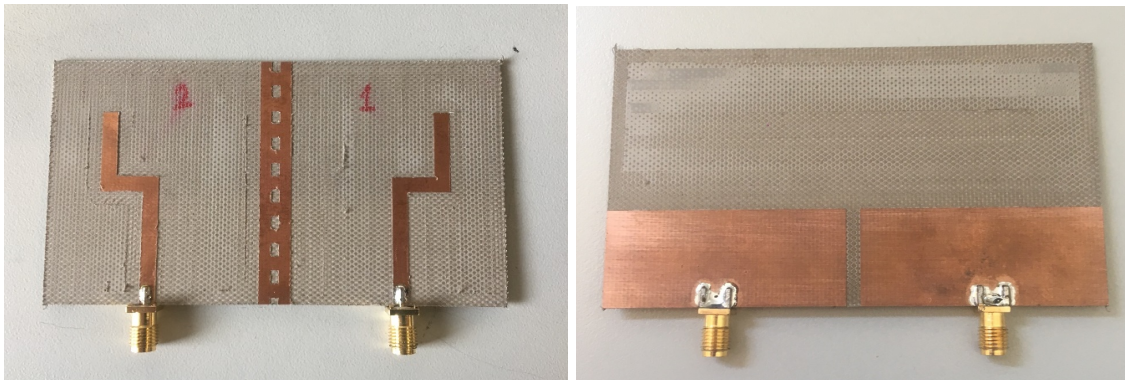


Figura 38. Antena MIMO de 2 elementos con barrera construida.

Una vez pasados los resultados por ADS, se obtienen los siguientes coeficientes:

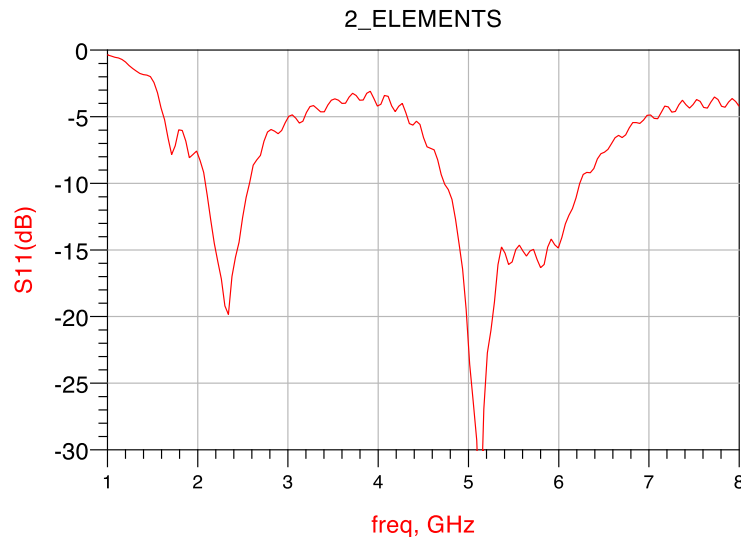


Figura 39. Antena MIMO de 2 elementos con barrera construida: Coeficientes de Reflexión.

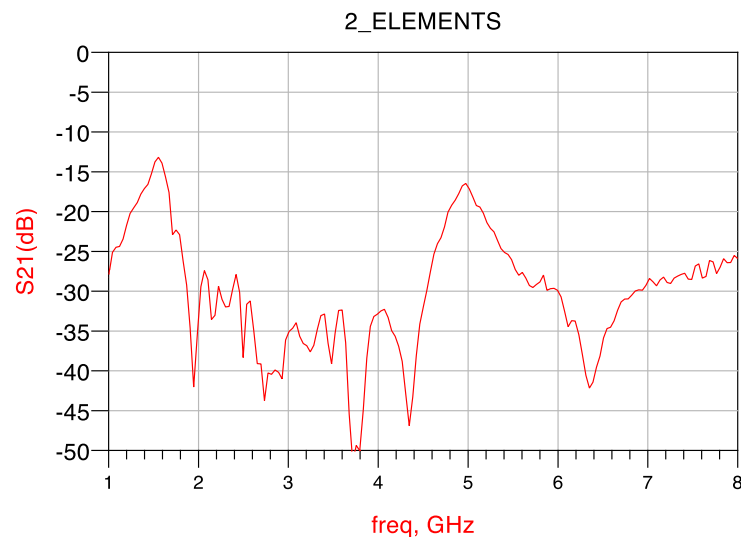


Figura 40. Antena MIMO de 2 elementos construida: Coeficientes de Acoplamiento.

En la Figura 39 los resultados esperados, muy parecidos a los de simulación. Se puede ver, que ambos coeficientes de reflexión y acoplamiento están por debajo de su límite (-10 dB y -15 dB, respectivamente).

A continuación, se muestran los resultados del diagrama de radiación medido en la cámara anecoica de la antena de 2 elementos con barrera, para las frecuencias centrales de nuestras bandas de trabajo es decir en 2,45 y 5,5 GHz

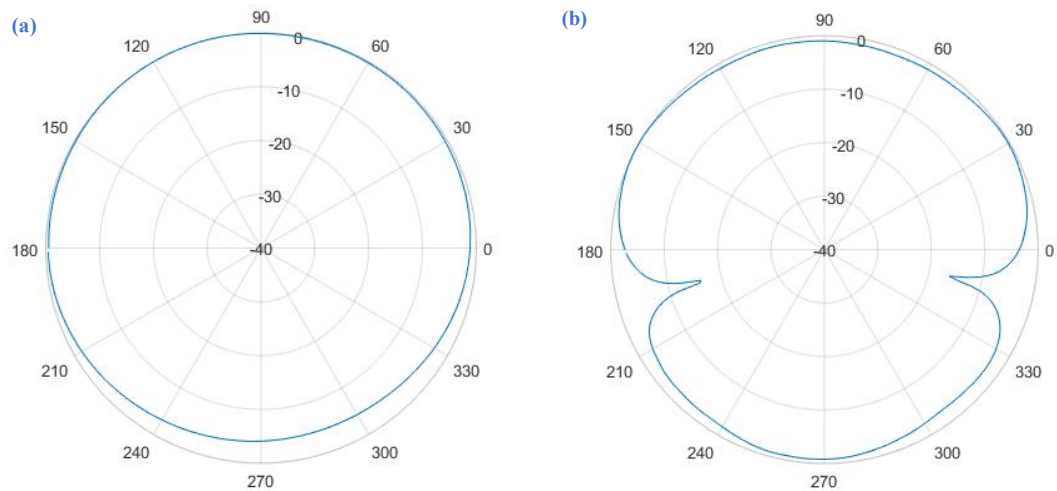


Figura 41. Antena MIMO 2 elementos construida: diagrama de radiación en 2.45 (a) y 5.5 (b) GHz del elemento 1

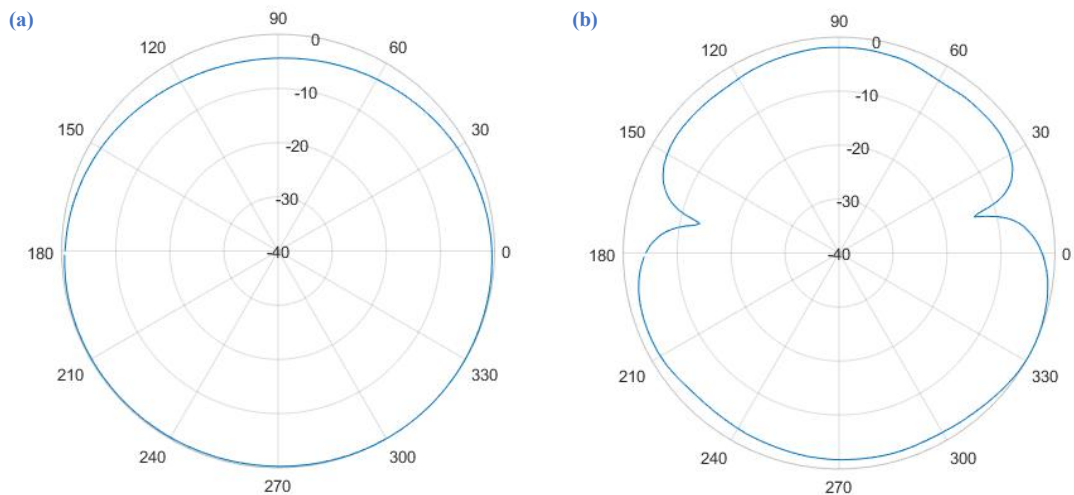


Figura 42. Antena MIMO de 2 elementos construida: diagrama de en 2.45 (a) y 5.5 (b) GHz del elemento 2

Como se puede observar en las Figuras (41, 42), el diagrama de radiación en el plano H a una frecuencia de 2,4 GHz es casi omnidireccional salvo en la zona de 90 (elemento 2) y 270 grados (elemento 1), que se corresponde con la dirección del otro elemento respectivamente de la antena MIMO.

En la frecuencia de 5.5 GHz, el diagrama de radiación es un poco directivo porque al aumentar la frecuencia de trabajo, la anchura relativa (W_{ant}/λ) del elemento radiante aumenta, aumentando su directividad. También se observa el mismo efecto comentado anteriormente producido por el elemento adyacente en 90 y 270 grados

En las siguientes Figuras (43, 44) se muestra el coeficiente de correlación y ganancia de diversidad de la antena de dos elementos con barrera, para ello se realiza un sencillo script de Matlab, en el que, introduciendo los datos medidos con el analizador de redes, se aplicaran las fórmulas (9, 11) de la correlación y ganancia de diversidad mencionados en el capítulo 3.4.

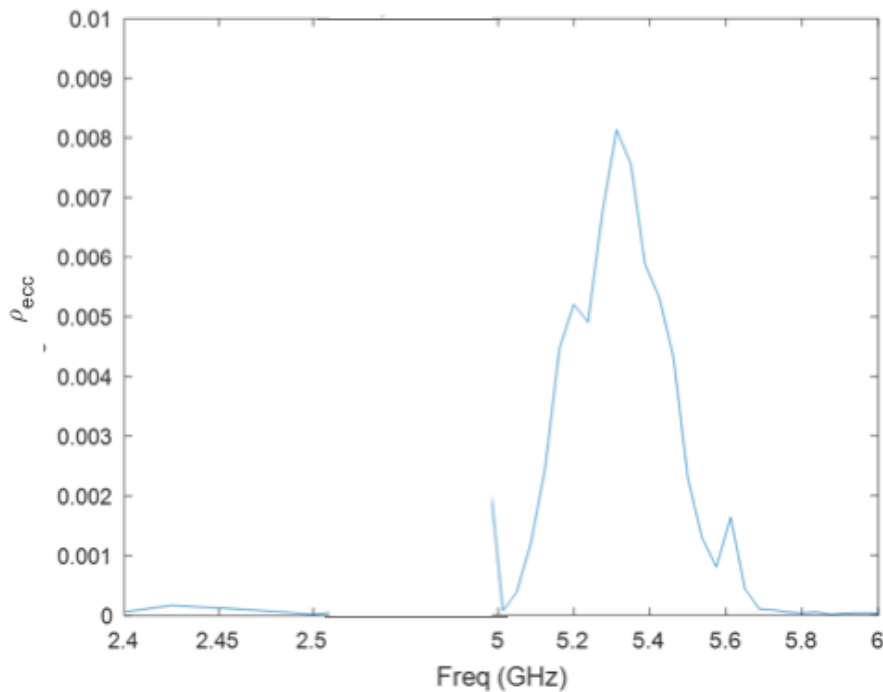


Figura 43. Coeficiente de correlación de antena de dos elementos con barrera.

Como se puede observar, en las dos bandas de trabajo el coeficiente de correlación es inferior a 0.018, que es el resultado peor cumpliendo los límites de los parámetros de reflexión y acoplamiento anteriormente definidos.

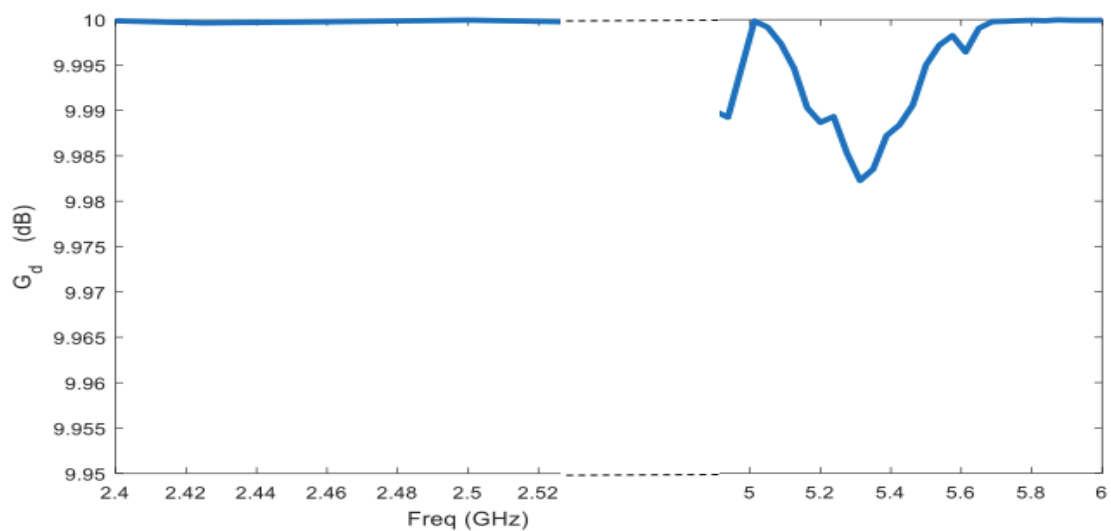


Figura 44. Ganancia de diversidad de antena de dos elementos con barrera.

En la Figura 44 se aprecia que en las bandas de trabajo la ganancia de diversidad esta prácticamente en su totalidad a 10 dB, que sería el resultado idóneo.

5.3 Antena MIMO de 4 elementos paralelos con barrera.

Antena construida con conectores soldados:

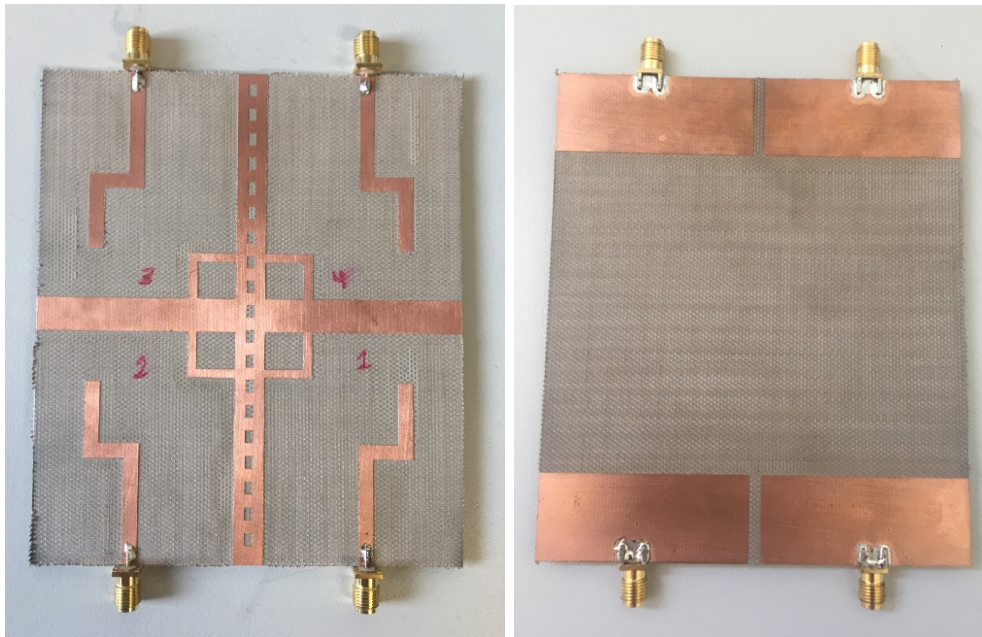


Figura 45. Antena MIMO de 2 elementos perpendiculares construida.

Tras añadir los ficheros del analizador de redes al ADS se obtienen los siguientes resultados medidos, por simetría todos los coeficientes de reflexión y acoplamiento son prácticamente iguales, solo se incluirán las medidas del elemento 1.

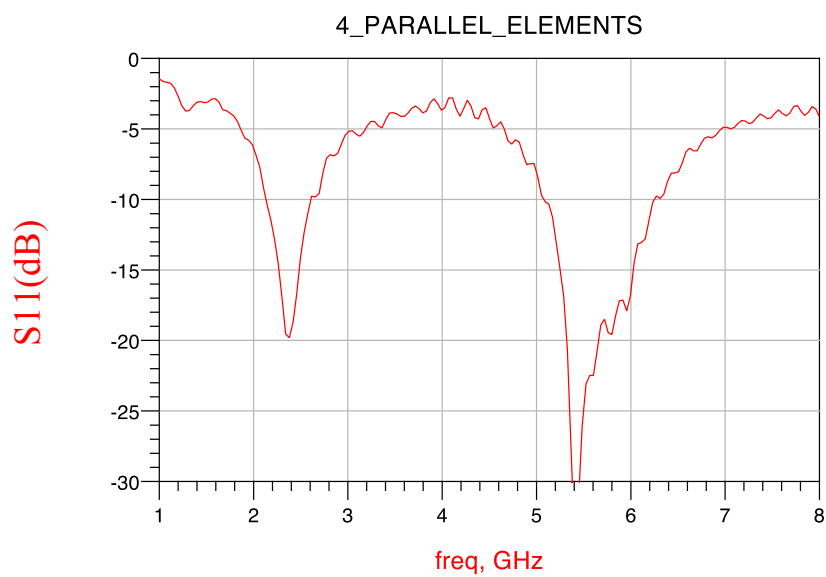


Figura 46. Antena MIMO de 4 elementos paralelos construida: Coeficientes de Reflexión.

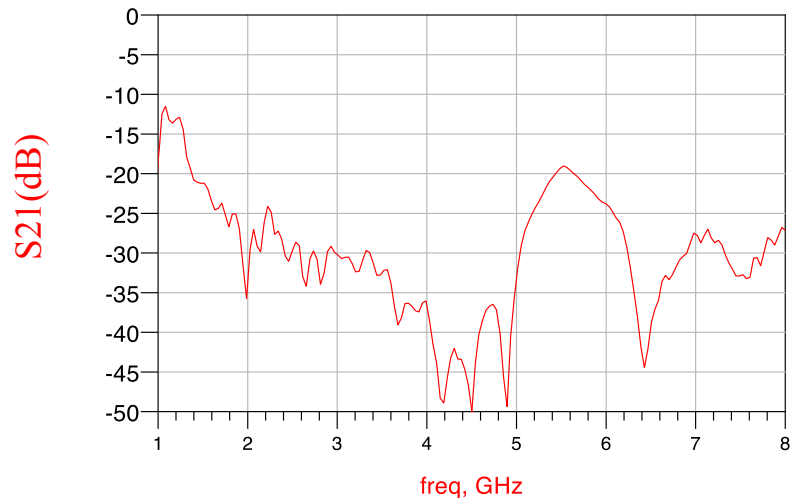


Figura 47. Antena MIMO de 2 elementos paralelos construida: Coeficientes de Acoplamiento.

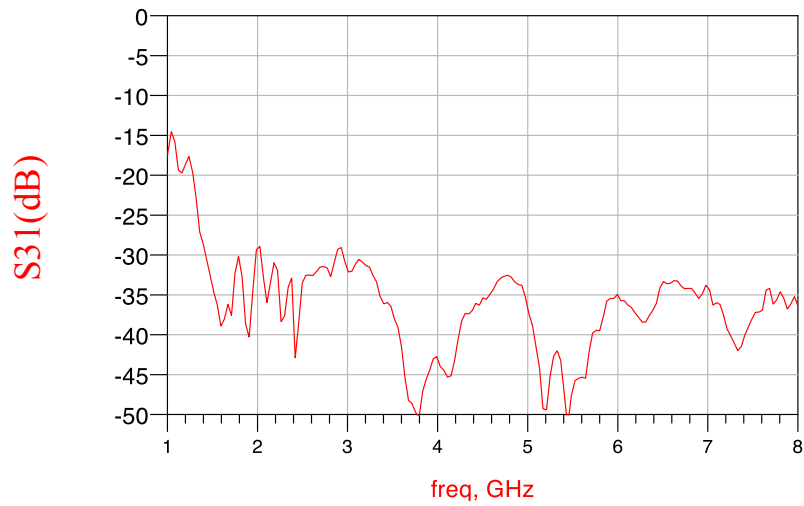


Figura 48. Antena MIMO de 2 elementos paralelos construida: Coeficientes de Acoplamiento.

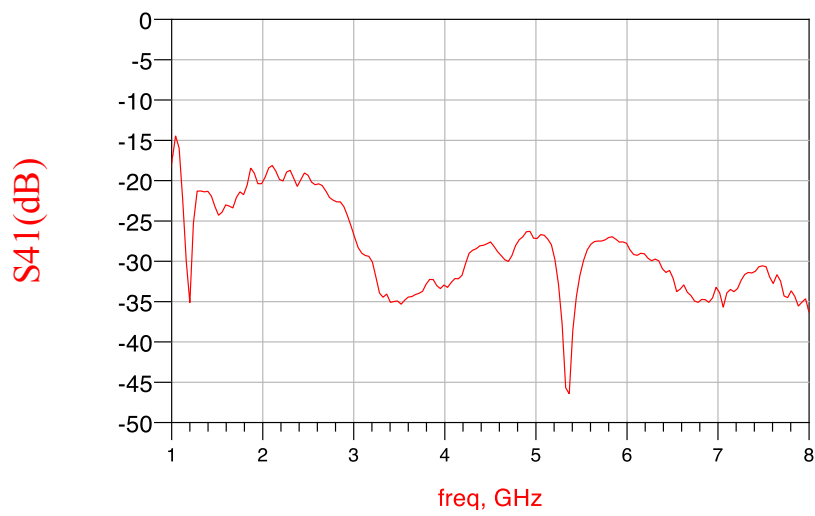


Figura 49. Antena MIMO de 2 elementos paralelos construida: Coeficientes de Acoplamiento.

Las Figuras (46, 47, 48, 49) muestran unos buenos resultados tras la medición. El coeficiente de reflexión está por debajo de los -10 dB en prácticamente toda la banda de trabajo y los parámetros de acoplamiento por debajo de los -20 dB en casi toda la banda.

A continuación, se muestran los resultados de los diagramas de radiación de la antena de 4 elementos con barrera metálica para cada uno de los puertos (1, 2, 3, 4) en las frecuencias de 2,45 y 5,5 GHz.

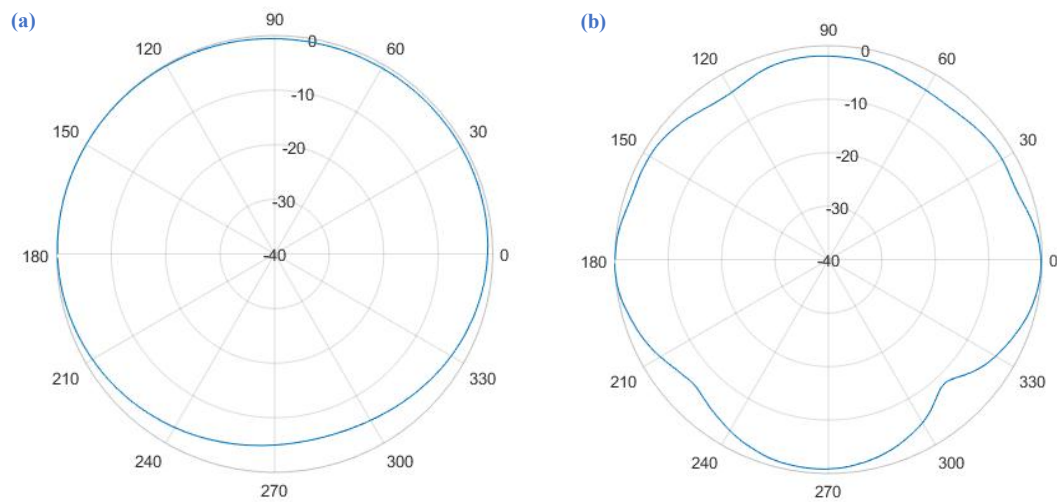


Figura 50. Antena MIMO de 4 elementos construida: diagrama de en 2.45(a) y 5.5 (b) GHz del elemento 1.

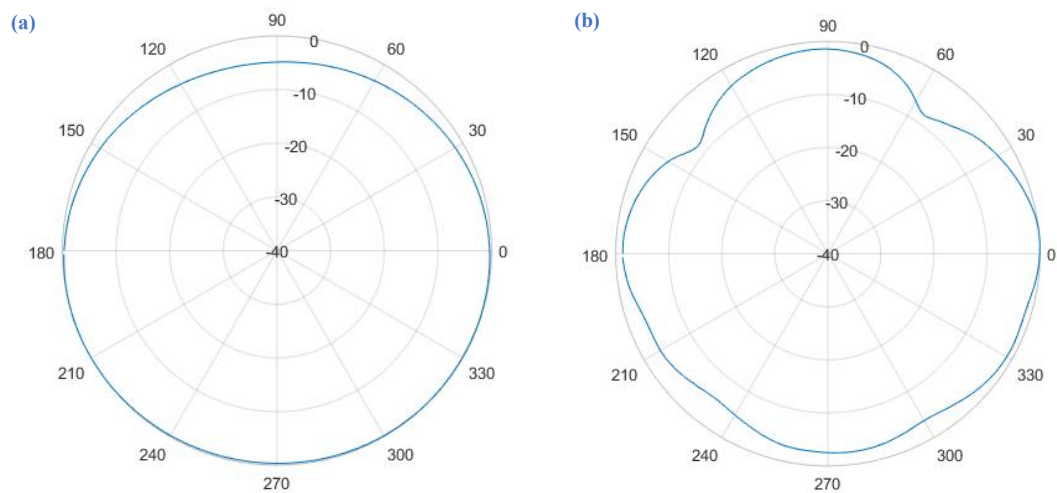


Figura 51. Antena MIMO de 4 elementos construida: diagrama de en 2.45 (a) y 5.5 (b) GHz del elemento 2.

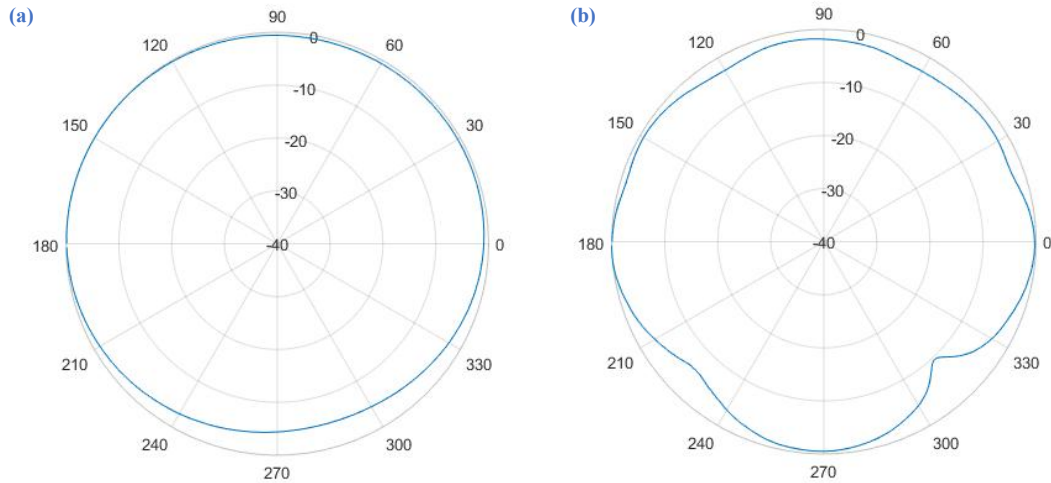


Figura 52. Antena MIMO de 4 elementos construida: diagrama de en 2.45 (a) y 5.5 (b) GHz del elemento 3.

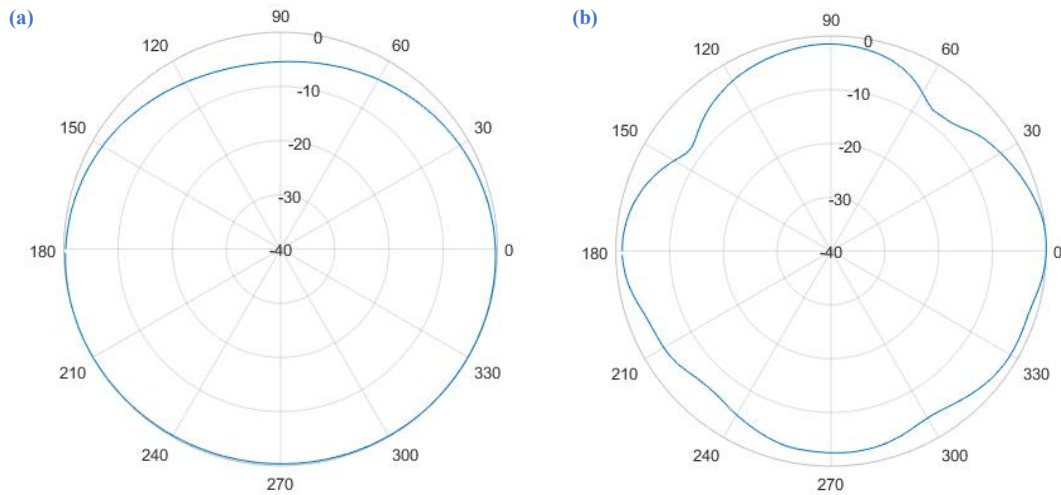


Figura 53. Antena MIMO de 4 elementos construida: diagrama de en 2.45 (a) y 5.5 (b) GHz del elemento 4.

Para la frecuencia de 2.4 GHz, en las Figuras (50, 51, 52, 53), el diagrama de radiación es casi en su totalidad omnidireccional, salvo para el ángulo de 90 o 270 grados (dependiendo del elemento que se este analizando), que coincide con la dirección de la barrera metálica, esto es un resultado lógico.

Para el caso de 5.5 GHz, además del efecto anteriormente comentado, también se observa la aparición de unos lóbulos debido que al aumentar la frecuencia de trabajo, la anchura relativa del elemento radiante aumenta, aumentando su directividad, sin embargo siguen siendo buenos resultados.

5.4. Antena MIMO de 4 elementos perpendiculares con barrera.

Antena construida con conectores soldados:

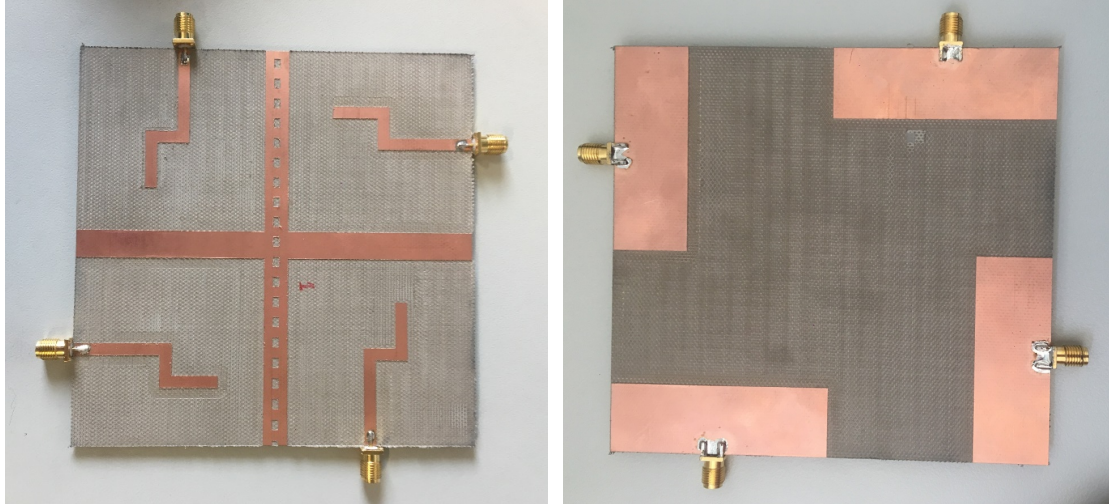


Figura 54. Antena MIMO de 4 elementos perpendicular con barrera construida.

Resultados de las medidas realizadas con el analizador de redes:

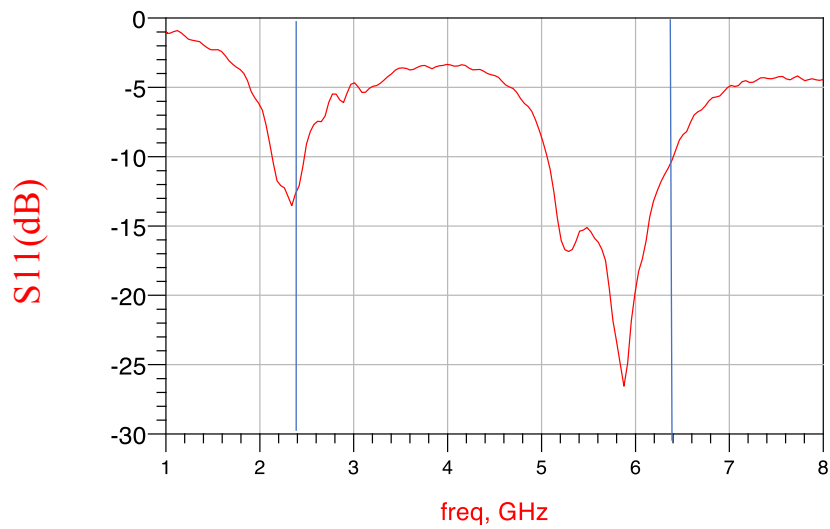


Figura 55. Antena MIMO de 4 elementos perpendicular con barrera construida: Coeficientes de Reflexión.

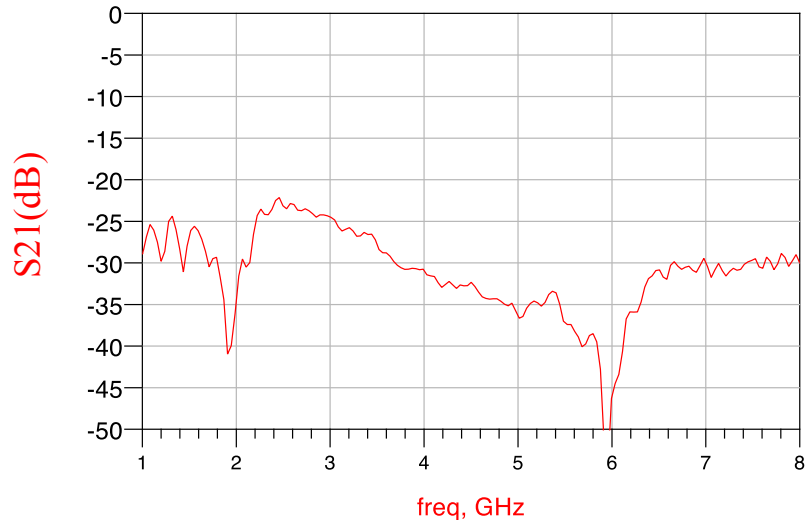


Figura 56. Antena MIMO de 4 elementos perpendicular con barrera construida: Coeficientes de Acoplamiento.

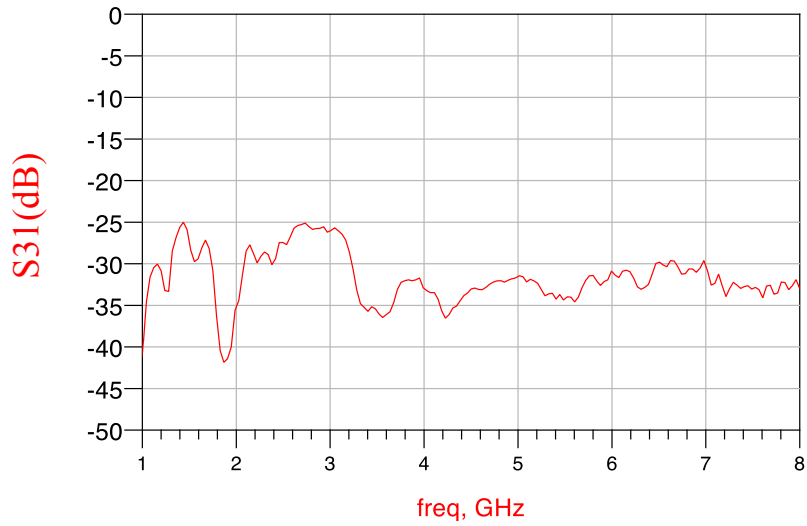


Figura 57. Antena MIMO de 4 elementos perpendicular con barrera construida: Coeficientes de Acoplamiento.

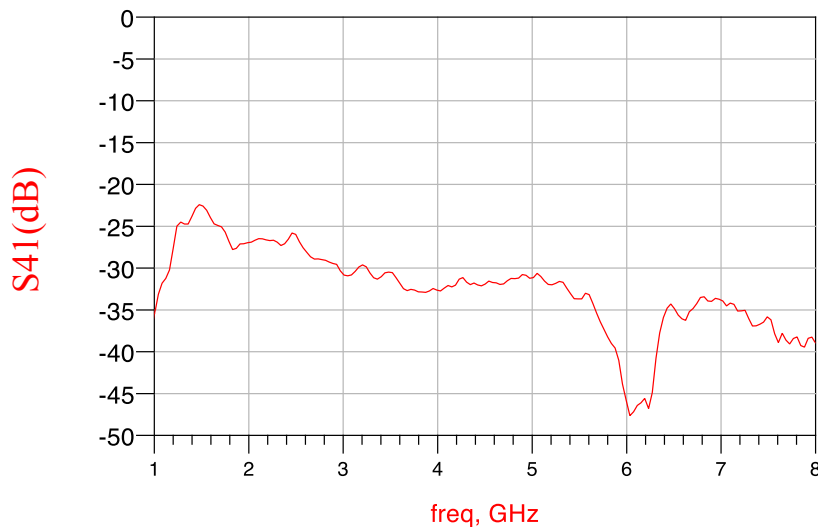


Figura 58. Antena MIMO de 4 elementos perpendicular con barrera construida: Coeficientes de Acoplamiento.

En la Figura 55 se aprecia como el coeficiente de reflexión sigue entrando dentro de la banda de trabajo de 2,4 GHz, aunque se puede ver que ha sufrido una leve desviación en esa frecuencia. Además, se puede apreciar como la banda del 5 GHz ha aumentado llegando a valores superiores a 6,4 GHz

Para las Figuras (56, 57, 58), correspondientes a los coeficientes de acoplamiento, se observa que salen algo mejor en la banda de 5-6 GHz respecto a los resultados de la simulación.

5. Conclusiones y trabajo futuro.

En este TFG se ha tratado el diseño de antenas MIMO utilizando diferentes configuraciones: antena de un elemento, de dos elementos paralelos, de cuatro elementos paralelos y de cuatro elementos perpendiculares. Se han realizado distintas pruebas con el tamaño y posiciones de la antena, así como de la barrera, que se añadirán en los anexos. Tal y como se quería, se han construido cuatro antenas distintas respetando el criterio de diseño para su uso en tecnología WiFi.

Para continuar con el trabajo se podrían probar distintas configuraciones, añadiendo algún elemento para incluir una tercera banda de trabajo, por ejemplo, a 3,5 GHz útil para su uso en comunicaciones 5G o WiMAX. De esta manera se podrá utilizar una misma antena MIMO para comunicarnos con mayor número de sistemas.

Otra de las líneas posibles de trabajo, es aumentar el número de puertos hasta 8 de nuestra antena MIMO, para mejorar las prestaciones del sistema MIMO que utiliza esta antena.

6. Referencias.

- [1] Foschini, G.J. and Gans, M.J., "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas", *Wireless Personal Communications*, Vol. 6, No. 3, (1998), 311-335.
- [2] Li, Q., Li, G., Lee, W., Lee, M., Mazzaresse, D., Clerckx, B., and Li, Z., "MIMO techniques in WiMAX and LTE: A feature overview," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 48, no. 5, pp. 86–92, 2010
- [3] Constantine A. Balanis. *Antenna Theory, Analysis and Design*. John Wiley and Sons, 2005.
- [4] Artículo "LAS TECNOLOGÍAS WIFI Y WIMAX"
http://www.dipbadajoz.es/agenda/tablon/jornadaWIFI/doc/tecnologias_wifi_wimax.pdf

7. Anexos.

Anexo A. Ground plane.

Como se puede observar, en todas las antenas de mas de un elemento, hemos añadido un pequeño espacio en el plano de mas, al que hemos llamado $d_{\text{ground_plane}}$ a continuación se muestra el motivo.

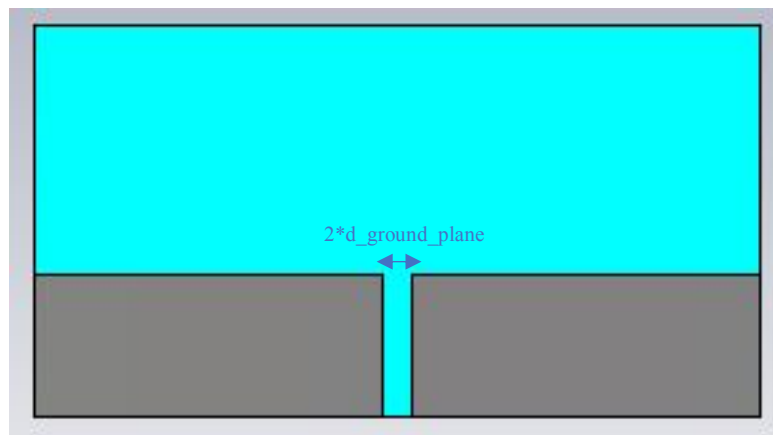


Figura 59. $d_{\text{ground_plane}}$

Tabla 8. Anexo A. Antena MIMO 2 elementos: medidas $d_{\text{ground_plane}}$

NUMERO	$d_{\text{ground_plane}}$ (mm)
1	0
2	0,5
3	1
4	1.5
5	2

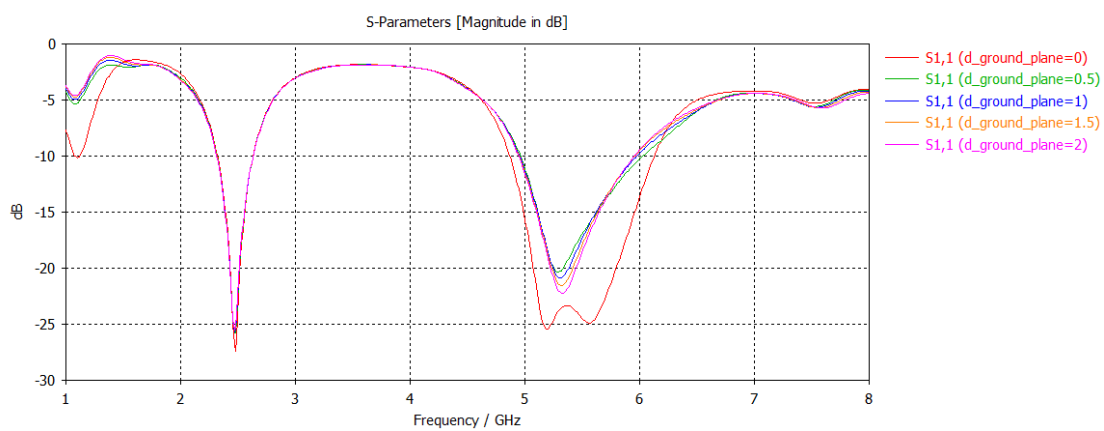


Figura 60. Coeficiente de reflexión ($d_{\text{ground_plane}}$)

Como se observa en la Figura 60 para el caso 1 ($d_{\text{ground_plane}}=0$, es decir con un único plano de masa para los dos elementos), la banda de 5 a 6 GHz aumenta considerablemente, esto es negativo, puesto que se buscan bandas lo mas ajustadas a el criterio para evitar captar o radiar frecuencias indeseadas.

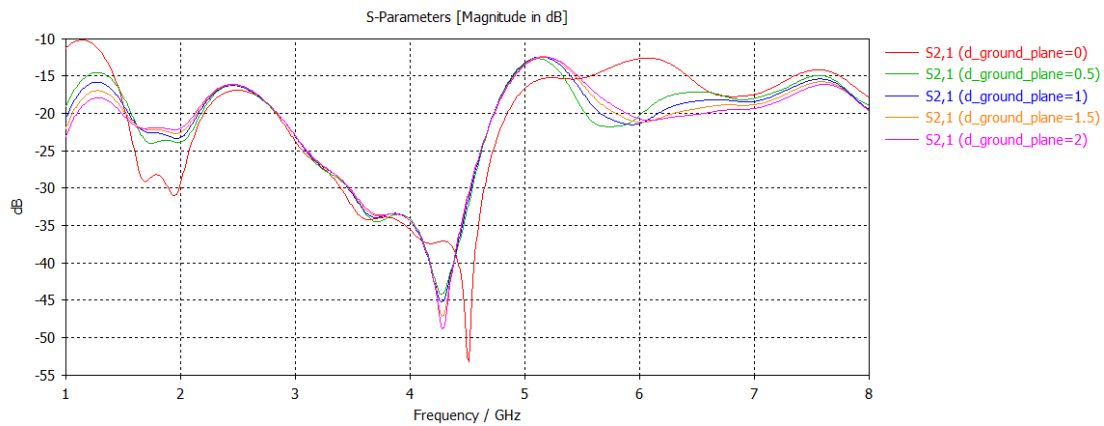


Figura 61. Coeficiente de acoplamiento ($d_{\text{ground_plane}}$)

Se decide elegir un $\text{ground_plane}=1.5$ mm, que es una opción intermedia puesto que a mayor distancia **mejor** resultado en la banda de trabajo, pero peor S21.

Anexo B. Formas barreras metálica.

En este anexo se representarán algunas de las distintas configuraciones de antenas que se han diseñado a lo largo de este TFG en busca de los mejores resultados posibles.

B.1. Barrera 2.

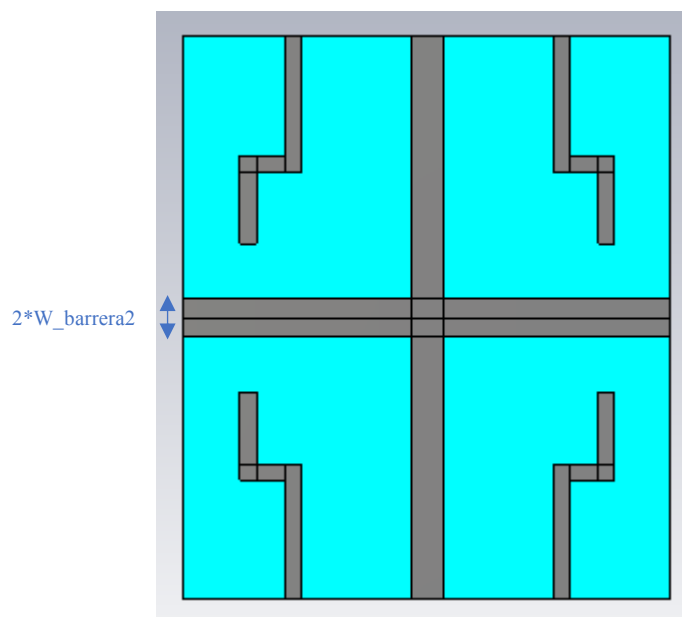


Figura 62. Variacion $W_{barrera2}$ en antena de 4 elementos

Tabla 9. Anexo B. Antena MIMO 4 elementos: medidas $W_{barrera2}$

NUMERO	W_barrera2 (mm)
1	6
2	8

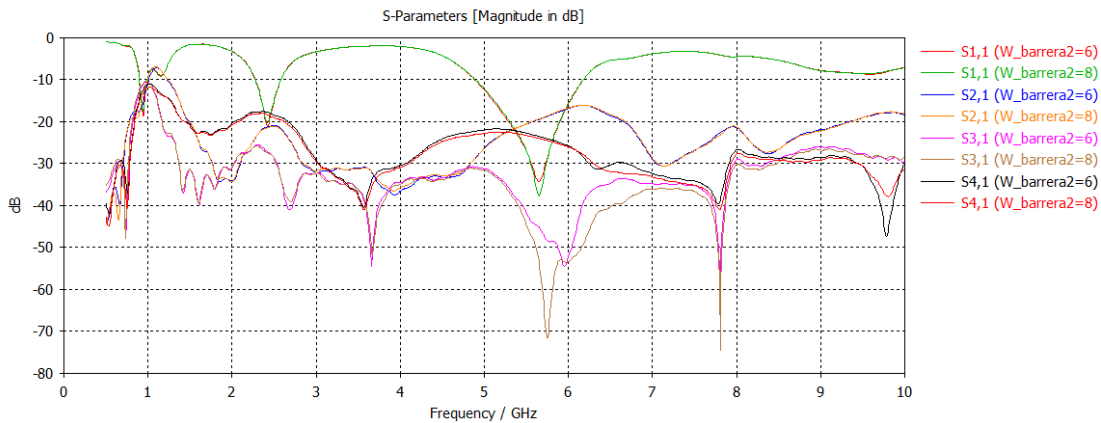


Figura 63. Coeficientes de Reflexión y Acoplamiento: variación $W_{barrera2}$

B.2. Círculos.

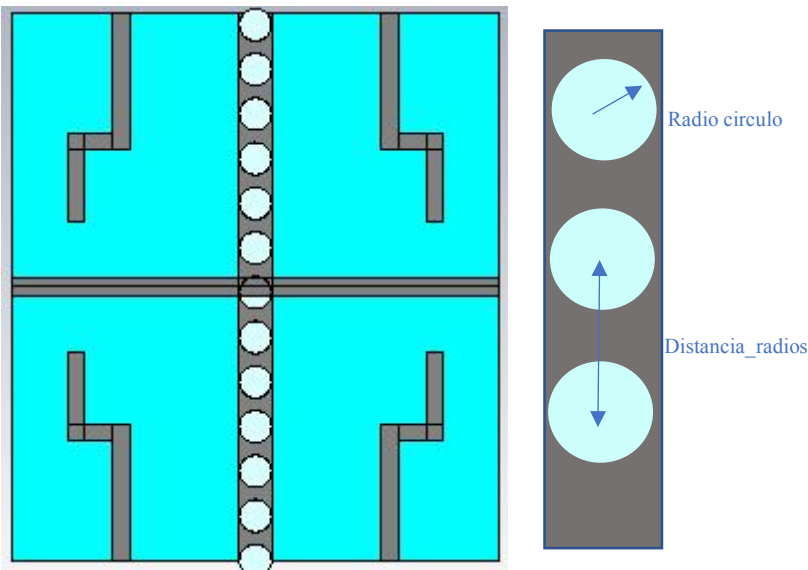


Figura 64. Barrera círculos

Tabla 10. Anexo B. Antena MIMO 4 elementos barrera con círculos: medidas distancia_radios, radio circulo

NUMERO	Distancia radios	Radio circulo
1	-0,5	1,5
2	-0,5	2,45
3	-0,5	3,4
4	0,5	1,5
5	0,5	2,45
6	0,5	3,4
7	1,5	1,5
8	1,5	2,45
9	1,5	3,4
10	2,5	1,5
11	2,5	2,45
12	2,5	3,4

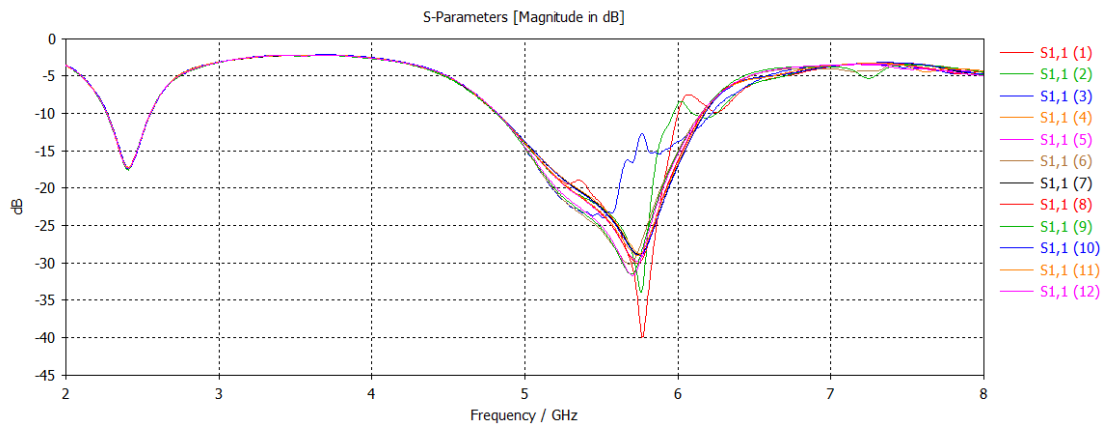


Figura 65. Coeficientes de reflexión S11 de antenna con barrera con círculos.

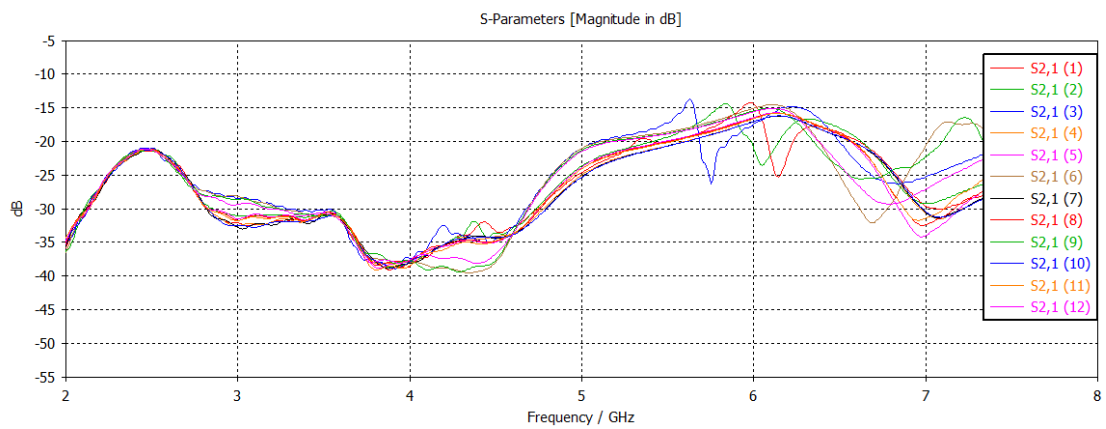


Figura 66. Coeficientes de Acoplamiento S2,1 de antenna con barrera con círculos

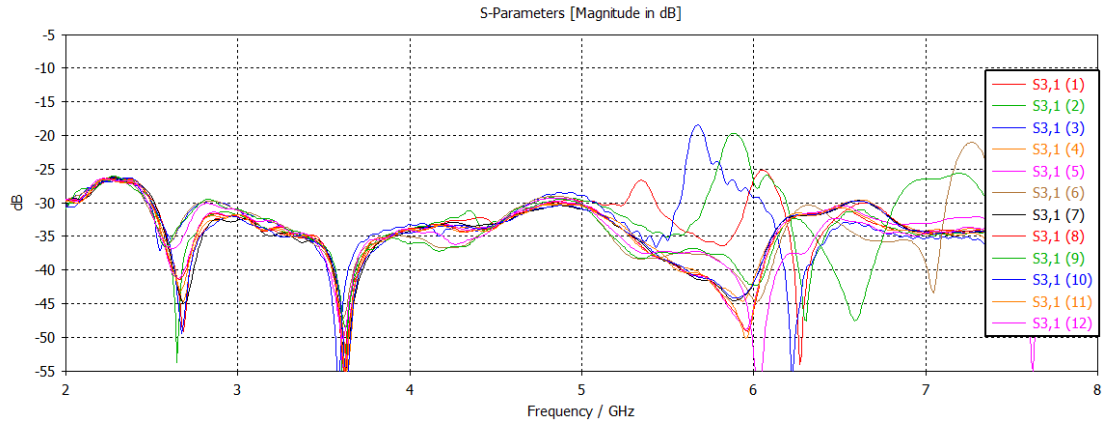


Figura 67. Coeficientes de Acoplamiento $S_{3,1}$ de antena con barrera con círculos.

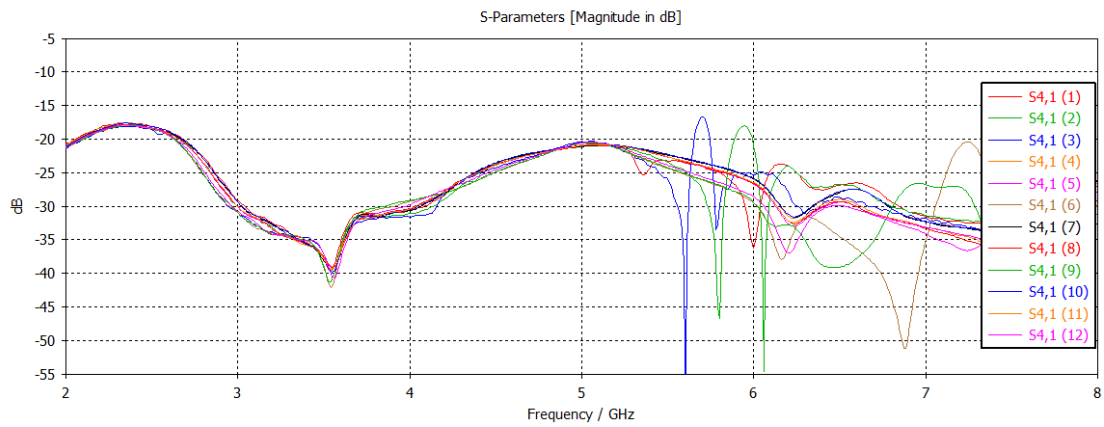


Figura 68. Coeficientes de Acoplamiento $S_{4,1}$ de antena con barrera con círculos.

B.3. Rectángulos.

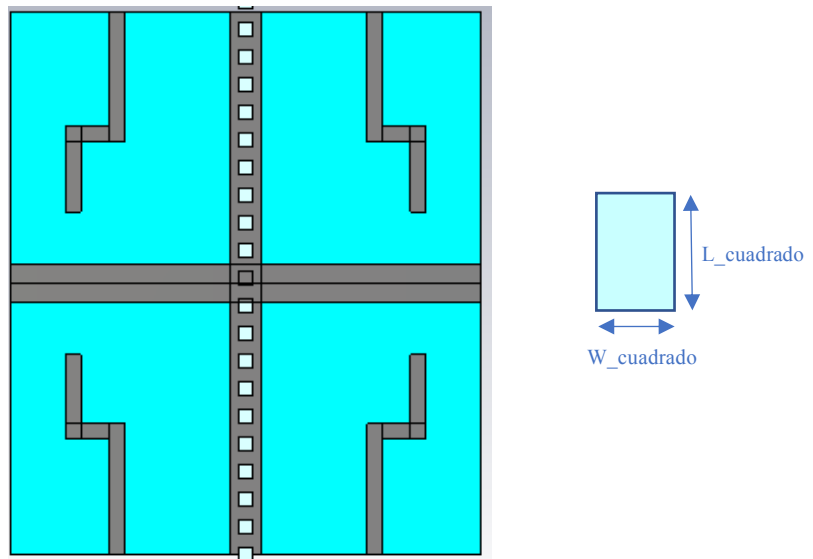


Figura 69 Antena MIMO 4 elementos barrera con rectángulos: medidas W_{cuadrado} , L_{cuadrado}

Tabla 11. Anexo B. Antena MIMO 4 elementos barrera con rectángulos: medidas W_{cuadrado} , L_{cuadrado}

NUMERO	W cuadrado	L cuadrado
1	1	1
2	2	1
3	3	1
4	1	2
5	2	2
6	3	2
7	1	3
8	2	3
9	3	3

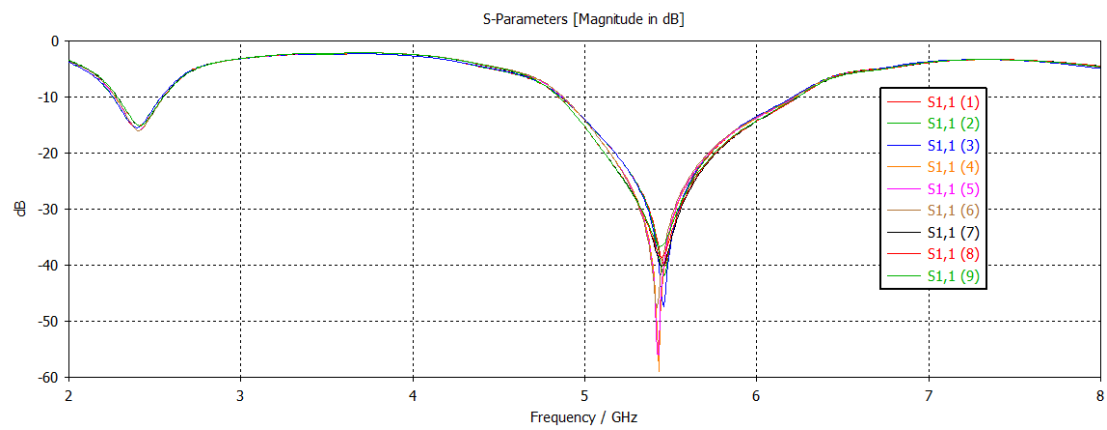


Figura 70. Coeficientes de Reflexión $S_{1,1}$ de antena con barrera con rectángulos.

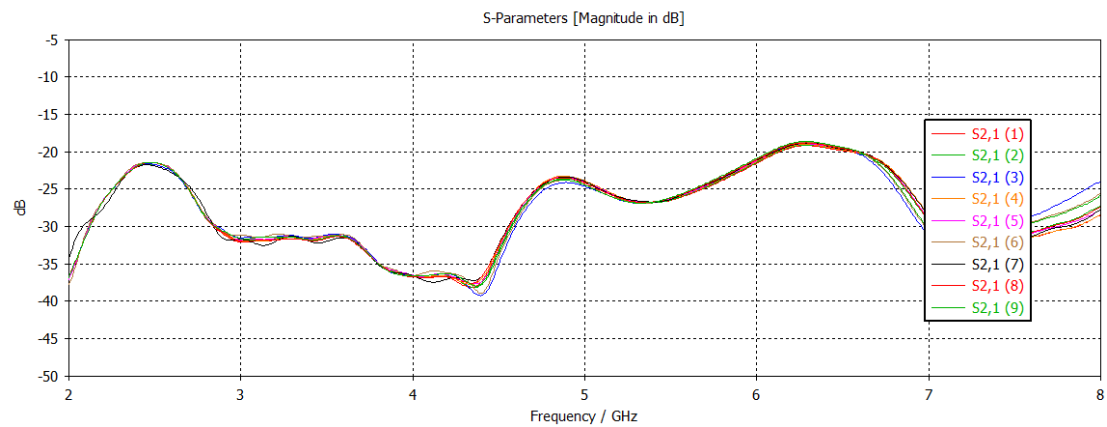


Figura 71. Coeficientes de Acoplamiento $S_{2,1}$ de antena con barrera con rectángulos.

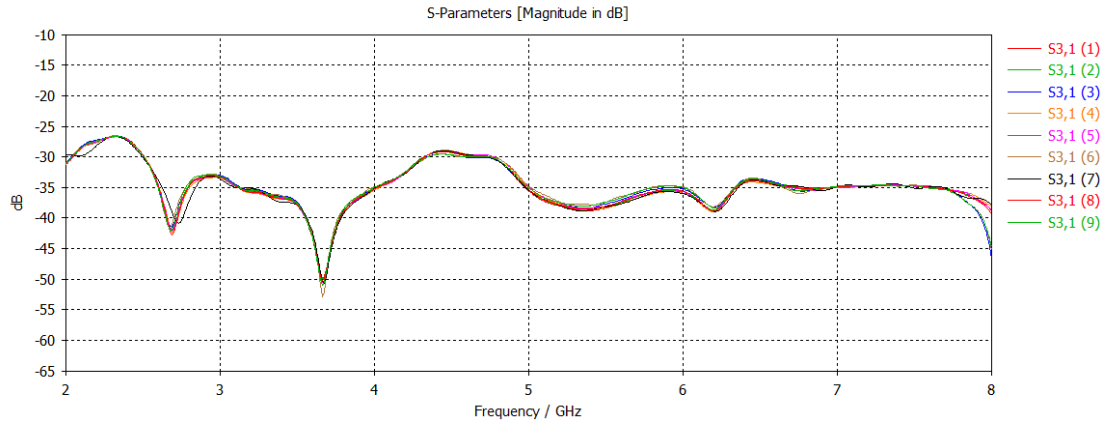


Figura 72. Coeficientes de Acoplamiento $S_{3,1}$ de antena con barrera con rectángulos.

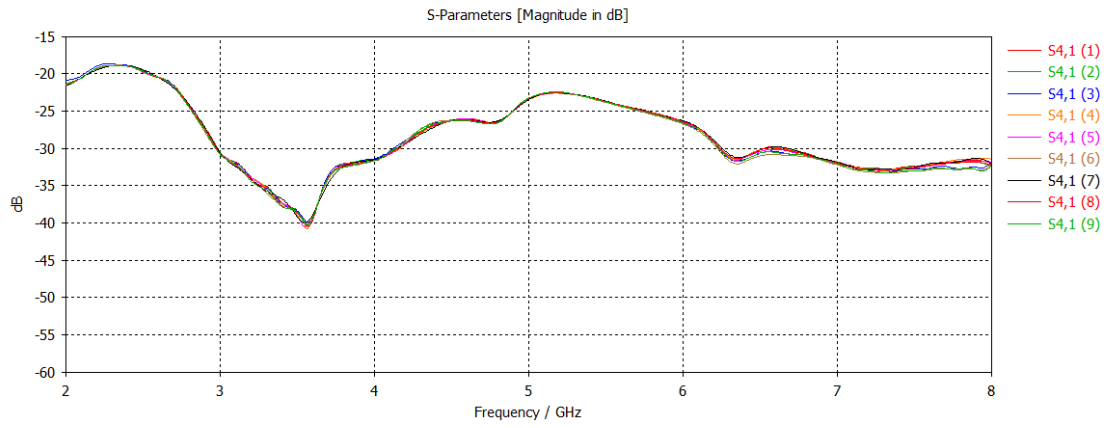


Figura 73. Coeficientes de Acoplamiento $S_{4,1}$ de antena con barrera con rectángulos.

B.4. Línea Intermedia.

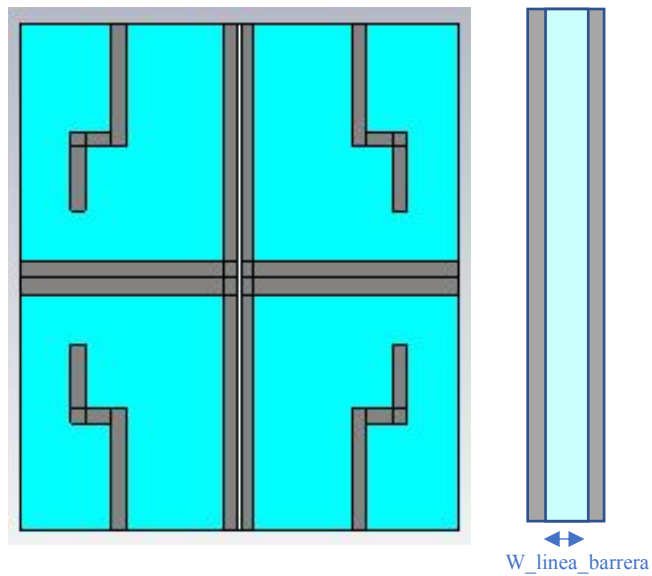


Figura 74. Antena MIMO 4 elementos barrera línea intermedia: medidas $W_{line_barrera}$

Tabla 12. Anexo B. Antena MIMO 4 elementos barrera con línea intermedia: medidas $W_{\text{línea barrera}}$.

NUMERO	W_línea barrera (mm)
1	0,5
2	1
3	1,5
4	2
5	2,5
6	3

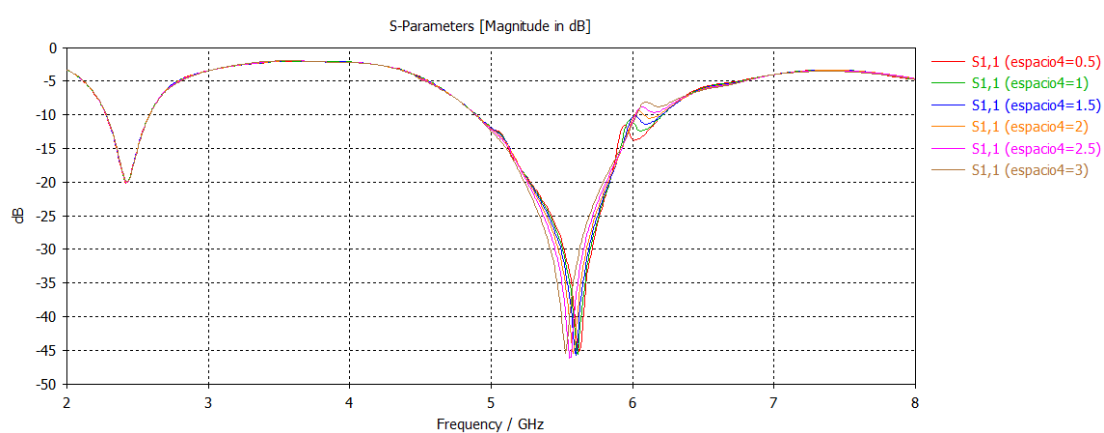


Figura 75. Coeficientes de Reflexión $S_{1,1}$ de antena barrera con línea intermedia.

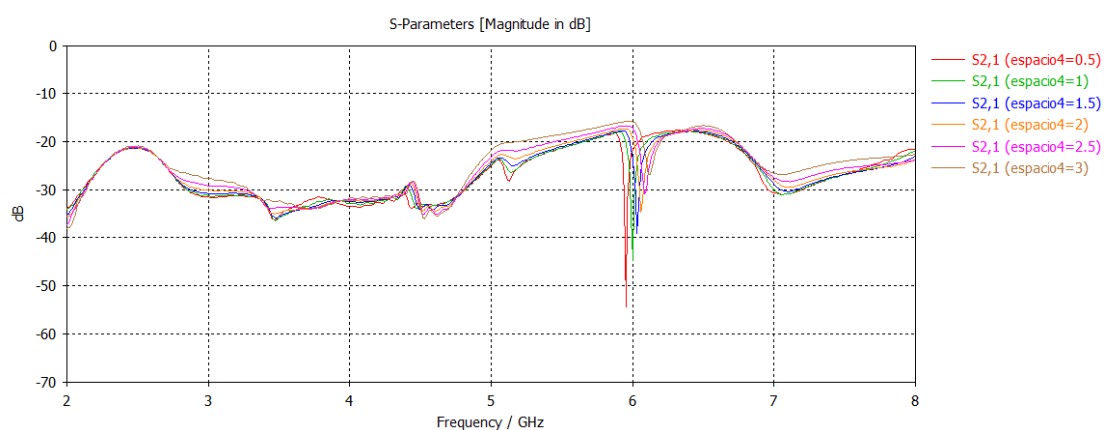


Figura 76. Coeficientes de Acoplamiento $S_{2,1}$ de antena barrera con línea intermedia.

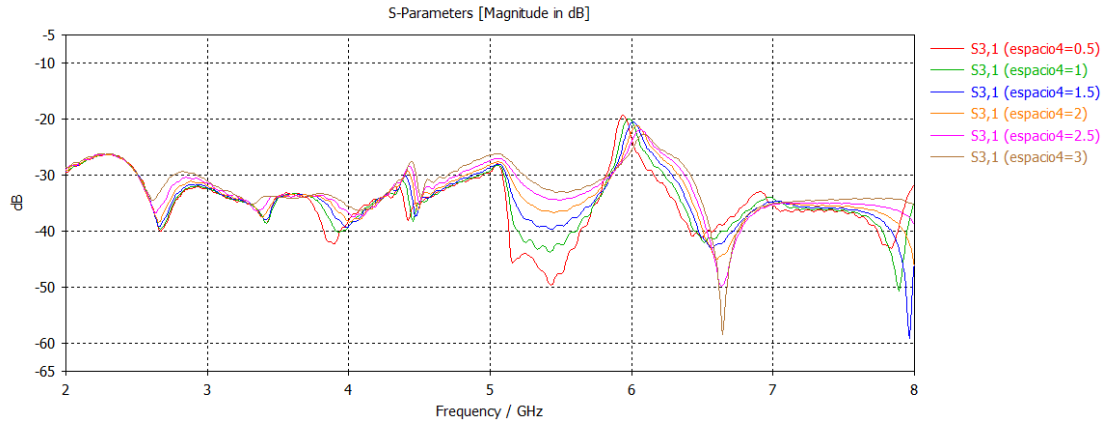


Figura 77. Coeficientes de Acoplamiento $S_{3,1}$ de antena barrera con línea intermedia.

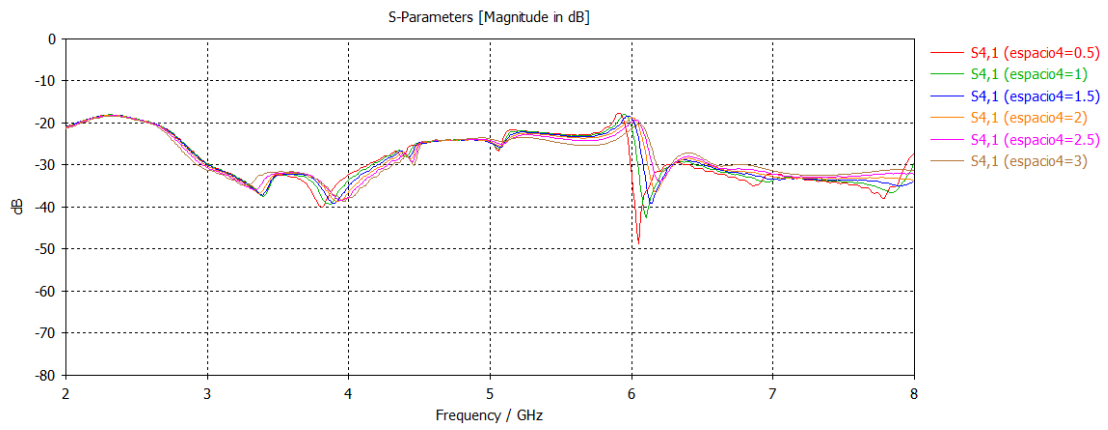


Figura 78. Coeficientes de Acoplamiento $S_{4,1}$ de antena barrera con línea intermedia.